Análisis Geológico Ambiental para el Desarrollo Comunitario de la Asistencia Primaria en Salud (APS) en el Municipio de Jucuarán

AGRADECIMIENTOS

Antes de nada queremos resaltar y reconocer el trabajo que hoy en día realizan las comunidades. Dada la ausencia de capacidades de las instituciones gubernamentales, las comunidades se asignan, en muchos casos, el trabajo que a éstas les está asignado. La relación que por este motivo mantenemos ONG´s y comunidades hace que, por limitados tiempos y recursos para realizar las actividades, impongamos tiempos de ejecución alterándoles el ritmo cotidiano.

En el caso de Jucuarán, la convivencia con el medio y la necesidad de paliar el descontrolado manejo de los recursos, es lo que motiva a los jucuareños de hoy, a demandar un análisis geológico-ambiental del municipio donde mostrar la situación ambiental actual, y evaluar las amenazas por erosión e inundaciones que afectan al municipio. No es tarea fácil en los tiempos en los que vivimos, sin embargo, el hecho de que las comunidades estén organizadas, supone además de una gran hazaña, un paso importante.

Tenemos la necesidad de agradecer a aquellas personas que trabajan duro por el bien-estar de los demás, y toman responsabilidades muchas veces por encima de las posibilidades de su vida cotidiana, superando en esfuerzo e interés frente cargos oficiales. Especialmente a todos aquellos que, de manera voluntaria, nos acompañaron levantando información valiosa, principalmente histórica, como insumo indispensable para el análisis de la situación actual.

También a aquellos otros responsables de cargos en la comunidad, y a los que se sumaron al esfuerzo con tareas específicas para el estudio como tomadores de registros “diarios” de precipitaciones, altura de agua en las quebradas, y otras muchas actividades que esperamos podamos llevar a adelante; como el transformar la información recogida y trabajada, para que sea la propia comunidad la que tome decisiones con esta herramienta que justifica la necesidad de actuar ante la situación medio ambiental y de riesgos actual del municipio.

Damos el reconocimiento que se merecen y las gracias a todos los integrantes que conforman directa o indirectamente el Comité Sur y el Comité Norte de Jucuarán, ya sean directivos, vocales, síndicos, promotores de salud, promotores de agua... así como profesionales de la educación, clínicas, párroco- convento de Jucuarán, esperamos no olvidar a nadie.

Del Comité Sur: Nicolás Ávalo y Cesario Madariaga- Salamar, de los cuáles siempre recibimos ayuda, así como a María Blanca-Promotora de Salud-Salamar y toda su familia, por acogernos siempre en su casa y ofrecernos su amistad; a José Julián Vázquez-Casa de Teja, con el que recorrimos su caserío; José Adán y Enemesio López-Promotor de Salud y

Bombero, respectivamente-Hacienda Concepción, con el que tomamos cada una de las medidas del pozo; a Mariano Villanueva-La Bocana, que nos recibió siempre con gran disposición a ayudar; José Adonai del Cid-Promotor de Salud, Puerto Caballo, que nos encontró siempre buenos guías conocedores de su caserío entre sus sobrinos; Francisca Méndez-Promotora de Salud, El Espino, que nos acompañó con gran amabilidad; Ángel Antonio Rivera -Promotor de Salud, Arcos del Espino, por esa visita al caserío en motocicleta; también Nicho-Arcos del Espino, gran maestro en su comunidad con habilidades que aún todos no hemos tenido el placer de oír; Ricardo y Aminta Campos-Quebracho, que incluso pararon en su trabajo para acompañarnos; Majín- El Convento y las niñas Tali y Milagros; Pedro Antonio Ábrego-Valle Seco, por su ayuda y agradable conversación; Francisco Hernández -Promotor de Salud, Las Flores, que nos atendió amablemente; María Angela Moreno- El Planón, por su valiosa información y Wilman Maravilla y Don Elidio- Samuria, por su disposición a trabajar por la comunidad. De la Ringlera a Lucia, conocedora de la sabiduría de la naturaleza y Toño- tomador de registros del pluviómetro ubicado en la Clínica. Arnoldo, Raúl- El espino. José, Beatriz, Vanesa y Joana, Ana y el Negro.

Del Comité Norte, nuestro reconocimiento y agradecimiento a: María Elena Argueta -Guazacapán, que además de acompañarnos, nos obsequió con su cariño; Chanita -Santa María, por su gran ayuda en numerosas ocasiones; Fidel Segovia y Fito -El Jutal, por su ayuda y buena disposición.

Muy especialmente, queremos dar las gracias a Eusebio Juarez y su familia-La Ringlera, que además de ofrecernos su más sincera amistad, siempre estuvo dispuesto a ayudar, ganando así un perfecto colaborador voluntario para la comunidad.

Y cómo no, a nuestros compañeros de Geólogos del Mundo, con los que compartimos sobre todo grandes ilusiones; unos desde España, como Roger, Marta, Juan Carlos, Yolanda, Ángel,…; y otros al *pie del volcán* como Cristina, Diana, Julia, Jose, Miguel Ángel, Karla, y especialmente a **Juli**, *GRAN QUIJOTE* de Geólogos del Mundo en El Salvador.

Agradecemos a la Generalitat de Catalunya, por la confianza depositada a nuestra institución y contrapartes, al poderla ver reflejada de manera directa en los beneficiarios de manera que se entiendan la importancia que supone a los beneficiarios directos e indirectos este primer esfuerzo iniciado en el 2003, esperando que esta se vea reforzado en futuros proyectos

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN **1**
1.1. Objetivos 5
1.2. Componentes del Estudio 6
2. METODOLOGÍA **11**
2.1.Preparación del proyecto 12
2.2.Trabajo de Campo 14
2.3. Procesamiento de datos 14
2.3.1. Caracterización Formaciones hidrogeológicas 15
2.3.2. Hidrodinámica 15
2.3.3. Balance hídrico 15
2.3.4. Hidrodinámica 16
2.3.5. Zonificación para factibilidad de la ubicación de un Relleno Sanitario 17
2.3.6. Susceptibilidad a inestabilidad gravitatoria 17
2.3.7. Peligrosidad por inestabilidad gravitatoria 17
2.3.8. Susceptibilidad a inundaciones y avenidas torrenciales 18
2.3.9. Peligrosidad por inundaciones y avenidas torrenciales 19
3. MARCO GEOGRÁFICO, POLITICO-ADMINISTRATIVO Y SOCIO-ECONÓMICO **20**
3.1. Contexto geográfico 20
3.2. División político-administrativo 21
3.3. Situación socio-económico 22
4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO **24**
4.1. Climatología 24
4.1.1. El clima en El Salvador 24
4.1.2. Comportamiento de la precipitación en el Salvador 29
4.1.3. Análisis de precipitaciones 30
4.2. Vegetación y usos del suelo 38
5. HIDROGRAFÍA SUPERFICIAL **46**
5.1. Delimitación de las subcuencas 48
5.2. Morfología. Caracteres cualitativos de la red de drenaje. 48
5.3. Morfometría. Caracteres cuantitativos de la red de drenaje. 56
6. GEOLOGÍA **68**
6.1. Marco geológico regional 69
6.2. Marco geológico local 70
6.3. Marco tectónico regional 85
6.4. Marco tectónico local 86
6.5. Geomorfología 93
6.5.1. Marco geomorfológico regional 94
6.5.2. Marco geomorfológico local 97
7. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS **104**
7.1. Formaciones hidrogeológicas 106
7.1.1. Formaciones hidrogeológicas de la zona 108
7.2.Inventario de puntos de agua 110

7.2.1.Piezometría 111
7.2.1.1.Mapa de isopiezas 113
7.2.2.Integración de información sobre los puntos de agua 114
7.3.Hidrogeoquímica 118
7.3.1.Toma de muestras y datos 118
7.3.2.Interpretación de los diagramas de Pipper y Scholeller 119
7.3.2.1.Diagramas de Pipper para muestras del 2001 119
7.3.2.2.Diagramas de Schoeller-Berkaloff para muestras del 2001. 120
7.3.2.3.Conclusiones de los resultados de las muestras del 2001. 120
7.3.2.4.Diagrama de Schoeller-Berkaloff para análisis del 2003 121
7.3.2.5.Diagrama de Pipper para análisis de 2003 122
7.3.3.Interpretación de los mapas y gráficos 122
7.3.3.1.Cloruros y conductividad eléctrica 122
7.3.3.2.pH 123
7.3.3.3.Bicarbonato y alcalinidad 124
7.3.3.4.Gases disueltos. Dióxido de carbono y oxígeno disuelto 124
7.3.3.5.Dureza. Calcio y Magnesio 125
7.3.3.6.Nitratos y fosfatos 125
7.3.4.Potabilidad del agua 125
7.3.4.1.Características físico-químicas 126
7.3.4.2.Características bacteriológicas 127
7.3.5.Causas de la contaminación de las aguas 129
7.3.6.Productos químicos utilizados en la zona 129
7.3.7.Fosas y vertederos 131
7.3.8.Protección de acuíferos y captaciones 132
7.3.9.Conclusiones y recomendaciones 133
7.3.9.1.Conclusiones 133
7.3.9.2.Recomendaciones 133
7.4.Modelo conceptual del acuífero 134
7.4.1.Modelo conceptual 134
7.4.2.Geología estructural. Importancia de las fallas 136
7.4.3.Manantiales 137
7.4.4.Parámetros hidrogeológicos 141
7.5.Balance hídrico 143
7.5.1.Límites del acuífero y condiciones de contorno 143
7.5.2.Extracción de agua 144
7.5.3.Infiltración por precipitación 145
7.5.4.Índice de infiltración 146
7.5.5.Precipitación efectiva 147
7.5.6.Contenido de humedad del suelo 148
7.5.7.Cálculo de la recarga 149
7.5.8.Salida por el límite de caudal constante 150
7.5.9.Balance de masas final 151
7.5.10.Discusión sobre el balance 153
7.6.Residuos sólidos urbanos 154
7.6.1.Ubicación para un vertedero de Residuos sólidos urbanos (RSU) en Jucuarán 154
7.6.2.Características de una zona para relleno sanitario 157
7.6.3.Alternativas a la construcción del relleno sanitario 158

7.6.4.Efecto de la basura sin una buena gestión 159
7.7.Prospección geofísica 159
7.7.1.Trabajos realizados 163
7.7.2.Resultados 165
7.7.3.Conclusiones 169
8. ANÁLISIS DE INUNDACIONES 171
8.1. Caracterización de la amenaza 172
8.1.1. Escorrentía superficial no canalizada 172
8.1.2. Avenidas e inundaciones asociadas a los ríos y quebradas 174
8.2. Mapa de áreas inundables 178
8.2.1. Determinación de los Escenarios 179
8.2.2. Realización del mapa 182
8.3. Análisis probabilística de ocurrencia de precipitaciones 186
8.4. Estudio hidrometeorológico 191
8.4.1. Límites y características de las subcuencas 192
8.4.2. Tiempo de concentración 193
8.4.3. Intensidad de lluvia 198
8.4.4. Coeficiente de escorrentía 201
8.4.5. Caudal máximo 203
8.4.6. Caudal máximo soportable 208
9. ANÁLISIS DE INESTABILIDADES GRAVITATORIAS 214
9.1. Caracterización de la Amenaza. 216
9.1.1. Tipología de las Inestabilidades 216
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 223
- Caracterización de los recursos hídricos 226
- Análisis de Inundaciones 232
- Puntos críticos 238
11. BIBLIOGRAFÍA 241

1.INTRODUCCIÓN

La situación geológica-geográfica de La República de El Salvador caracteriza al país por presentar una intensa actividad eruptiva a lo largo de su historia geológica que ha dado lugar a la formación de numerosos edificios volcánicos sobre un relieve de planicie. Se trata pues, de un país relativamente joven, de tierras fértiles y abundante agua. Un país indudablemente rico en lo que respecta a los elementos naturales o “recursos” naturales: tierra y agua, flora y fauna, sin olvidarnos del aire y el sol que lo calienta.

Sin embargo, la historia del hombre sobre estas tierras a incidido negativamente y de manera incalculable en las innatas riquezas que el país poseía. El “éxito” de la evolución o desarrollo del hombre debería medirse según su adaptación al medio en el que vive, incluyendo el respecto a los demás seres vivos y de cómo ha manejado los “recursos” naturales de los que disponía o dispone. Sin embargo el modelo de desarrollo impuesto a lo largo de la historia del hombre se orienta hacia otros valores que no han respetado y valorado las primeras y únicas maravillas, la tierra y los elementos que la conforman. Los recursos naturales han sido y están siendo, visto el panorama mundial actual, objeto de guerras, explotaciones y tantas y tantas atrocidades que intentan mostrarnos como sucesos cotidianos. “La incomprensión del presente nace fatalmente de la ignorancia del pasado” (Marc Bloch)

Desde el punto de vista de la Gestión del Riesgo cabe resaltar que la mayoría de complejos volcánicos que conforman el relieve de El Salvador están formados por materiales volcánicos poco consolidados sometidos a la continua acción erosiva de los agentes geológicos externos, especialmente precipitaciones durante el período de lluvias, y agentes geológicos internos como la continua sismicidad característica de todo Centroamérica. Esto da lugar a un terreno altamente vulnerable a la erosión, en el que el fuerte control tectónico favorece la incisión de la red de drenaje dando lugar a terrenos quebrados caracterizados por la ocurrencia de movimientos gravitatorios.

Las características geológicas de El Salvador y concretamente de Jucuarán son decisivas a la hora de ordenar el territorio de acorde a un modelo de desarrollo sostenible. El Municipio de Jucuarán se caracteriza por la elevación que conforma la cordillera de Jucuarán a la cuál rodean planicies. La cordillera de Jucuarán constituye un conjunto de complejos volcánicos inactivos de materiales poco consolidados que presentan grandes evidencias de desmantelamiento o erosión. A la vez, el relieve característico de Jucuarán conforma una reserva de agua en su interior proveniente únicamente, según los estudios realizados, de las aguas lluvia. La falta de abastecimiento de agua potable en muchas de las comunidades del municipio, así como la disminución de caudal de las fuentes actuales que

abastecen a la población y dan vida a Jucuarán, convierten la caracterización hidrogeológica en una herramienta indispensable para la gestión del agua, ya que describe la dinámica de ésta, estimando la cantidad y calidad de este recurso, regulando este recurso de acuerdo a las condiciones presentes en el municipio. El agua, recurso vital para la vida, se esta viendo afectada en Jucuarán por la contaminación de desechos sólidos y líquidos que generamos a día a día. La falta de planificación en este aspecto constituyen una amenaza constante que eleva nuestro grado de vulnerabilidad afectando el medio ambiente y consecuentemente la salud de los jucuareños.

En la actualidad los procesos geológicos externos recurrentes, que desencadenan amenazas en el municipio de Jucuarán son principalmente las lluvias. Las precipitaciones intensas características del clima que impera en el país, y concretamente en esta región de oriente, desencadenan diferentes procesos geológicos: erosión del terreno, en forma superficial o en movimientos en masa en la zona montañosa; y avenidas torrenciales en quebradas y ríos afectando principalmente las zonas de desembocadura donde actualmente se encuentra la ubicación de asentamientos humanos y sus actividades. La caracterización de estas amenazas son herramientas indispensables para el ordenamiento del territorio acorde a las condiciones y procesos naturales del municipio, por tanto, para la gestión del riesgo.

Otras amenazas geológicas identificadas en el municipio son: amenaza por inundación (lenta) del Río Grande de San Miguel en la zona norte del municipio; amenaza por erosión de la costa en la barra de playa conocida como la playa del Espino; la cercanía al volcán Chaparrastique ubicado al norte del municipio, que constituye un amenaza volcánica; y por último la alta sismicidad característica del país constituye una amenaza sísmica y pudiendo tener asociada, en función de la ubicación del epicentro, una amenaza por tsunami en la zona de costa.

Las desordenadas actividades del hombre y el inadecuado manejo de las cuencas transforman estos procesos geológicos naturales en riesgos, además de contribuir al riesgo por escasez y contaminación del agua. Definidas las actuaciones del hombre como aportaciones en estos procesos, debemos hablar de las amenazas socio-naturales y antrópicas presentes también en el municipio: deforestación de las partes altas de las cuencas y de la zona del estero; prácticas agrícolas en terrenos de altas pendientes con la consecuente pérdida del suelo fértil y la aceleración de inestabilidades; pérdidas del agua de infiltración, por tanto, disminución del almacenaje de los mantos acuíferos y un aumento del agua de escorrentía que puede derivar en avenidas torrenciales de gran envergadura, contaminación de suelos y agua por el uso de agroquímicos altamente tóxicos; y un inadecuado manejo de los desechos sólidos.

Los procesos geológicos e hidrogeológicos son condicionados por un gran número de variables y es necesario tener en cuenta la mayor parte de ellas para dar confiabilidad a los resultados de los estudios. En gran medida se parte de la información ya existente, que es necesario asimilar, valorar y validar para garantizar la cobertura y calidad de los datos. Debido a los escasos insumos existentes con los que se inicia el estudio, las amenazas geológicas en las que el estudio no ha podido profundizar se describen de forma contextualizadora en la caracterización de amenazas, quedando detallas sólo aquellas que se vieron como prioritarias en la etapa de identificación del proyecto junto a las comunidades. Por último, remarcar el hecho de que se trata de estudios sobre procesos cambiantes y por tanto que los productos resultantes no son definitivos y fijos, sino que deben ser flexibles y actualizables.

En el presente estudio se realiza una descripción general del medio físico y de la geología detallada a escala E-1:25.000 la zona Suroeste del municipio. Comprende también una caracterización hidrogeológica de la zona Suroeste con el objetivo de analizar el recurso hídrico; que comprende el estudio de las propiedades hidrogeológicas de los materiales, inventario de puntos de agua, la hidrodinámica de los acuíferos, su balance hídrico (cantidad) y las características hidroquímicas de los mismos (calidad). Para la elaboración de dicho estudio se ha partido del análisis y recopilación de diversa documentación, así como del trabajo de campo donde se incluye la valiosa información de los pobladores, fotointerpretación, análisis químicos y sondeos eléctricos.

Se profundiza además en el análisis de las amenazas por movimientos en masa o inestabilidad gravitatoria y por avenidas torrenciales que afectan al municipio. Dicho análisis incluye una caracterización de las amenazas, así como una determinación de la susceptibilidad y peligrosidad sin poder llegar en estos primeros pasos a la complejidad que implica un análisis de riesgos. La elaboración de este estudio se ha basado en observaciones de campo, fotointerpretación, entrevistas con pobladores, análisis de datos disponibles de precipitaciones, sismos y eventos ocurridos en la zona.

Se cuenta con escasa información sobre eventos en el municipio de Jucuarán debido a la falta de registro histórico en los diferentes niveles organizativos desde el nivel nacional hasta el comunitario. No obstante, se han tomado los datos de los eventos que afectaron zonas próximas al municipio del Catálogo de Desastres, Accidentes y Ecología (1915-1990), considerando que también pudieron afectar al municipio de Jucuarán debido a su proximidad.

El estudio geológico ambiental surge de entender la salud integral como eje del desarrollo local. La presión que actualmente sufren los recursos naturales como el agua, tierra fértil, masa boscosa, etc. debido al aumento de la población y a las futuras proyecciones que sobre tierras jucuareñas se visualicen, requiere del conocimiento de la situación actual de los recursos naturales sobre los que se desarrollan las comunidades. De

esta forma se podrá ordenar y planificar su uso de acuerdo a un modelo de desarrollo que garantice la sostenibilidad a partir de la participación de los diferentes actores y considerando y respetando al medio ambiente (entorno natural, físico, social, económico...). De esta manera, podemos prevenir futuras situaciones de escasez, sobreexplotación, contaminación, riesgo, es decir, la pérdida de las riquezas que aún conserva este rincón de El Salvador y que indudablemente darían lugar a un empeoramiento de la calidad de vida.

En este sentido, los objetivos del presente estudio, así como los principales ejes entorno a los que ha girado el trabajo para lograr los objetivos, son los que siguen a continuación.

1.1.Objetivos

El proyecto pretende profundizar en los conocimientos geológicos, técnicos y científicos con el fin de evaluar los recursos presentes, principalmente los referentes al recurso hídrico, y de comprender la dinámica de los procesos geológicos que han afectado al área de estudio, como son las inestabilidades de ladera o movimientos en masa y la formación avenidas torrenciales y desbordamientos. Mediante la caracterización e inventario del recurso hídrico y de las zonas más afectadas por estos procesos se han realizado cartografías de caracterización, susceptibilidad y de áreas inundables por avenidas torrenciales que sirven de herramienta para la gestión de recursos, ubicación de las zonas de alta peligrosidad, ordenamiento territorial, prevención de desastres y evaluación de recomendaciones para la mitigación de las amenazas. En definitiva para una gestión de recursos y riesgos adecuada a las características del municipio y su población. Además se han fortalecido y creado espacios para compartir y comentar la situación actual en cuanto a recursos naturales y gestión de riesgos, espacios que dan pie a definir conjuntamente cuales van a ser las medidas o acciones a tomar frente a las problemáticas diagnosticadas.

Objetivo general

Facilitar, a los diferentes niveles organizativos o actores que participan en las bases necesarias para el desarrollo de una política de gestión de recursos, de ordenación territorial y de prevención y mitigación de riesgos geológicos, una herramienta para contribuir a un desarrollo sostenible del municipio de Jucuarán.

Objetivos específicos

- Caracterización y dimensionamiento del recurso hídrico (subterráneo) de la zona Suroeste para una mejor gestión del agua.
- Caracterización y dimensionamiento de los riesgos geológicos del municipio.

- Capacitar a la Unidad Medioambiental y agentes de salud de Jucuarán en el campo de los riesgos geológicos y saneamiento ambiental.
- Determinar las áreas de peligrosidad y las zonas aptas para el desarrollo de actividades.
- Recomendar las acciones especiales, inmediatas o específicas para la gestión del recurso hídrico y la prevención y gestión del riesgo.

1.2. Componentes del estudio

La determinación de los componentes del estudio se ha definido teniendo en cuenta los diferentes destinatarios. De esta manera se han creado insumos destinados a los diferentes niveles organizativos, así como insumos para las posteriores acciones de actuación. La consecución de los objetivos planteados se ha desarrollado a partir de cinco grandes ejes o componentes. Tres de las componentes tienen el objetivo de ampliar los conocimientos de las características físicas y procesos naturales del municipio, así como dejar las bases de datos y registros para la posteriores acciones: Inventarios de puntos de interés, cartografías y caracterización de las diferentes temáticas abordadas. A estas tres componentes se les ha dado un mayor peso debido a la falta de profesionales para su elaboración. La cuarta componente se destina a dar a conocer la situación diagnosticada; sensibilización, divulgación y capacitación con el objetivo de fortalecer las capacidades de los diferentes actores y tomadores de decisiones del municipio. Las diferentes componentes se complementan unas con otras, alimentándose recíprocamente.

Inventarios de puntos de las diferentes temáticas de estudio, se realizan con el objetivo de registrar los diferentes puntos de interés del municipio: litológicos, puntos de agua, puntos de contaminación y puntos afectados por inestabilidades gravitatorias y avenidas torrenciales. Los puntos de interés han sido seleccionados, en gran parte, por los pobladores de la zona, los mayores conocedores de esta región. La recopilación de esta información adquiere un doble carácter funcional. Por un lado, es necesaria para la ampliación del conocimiento técnico de las características físicas y procesos naturales que tienen lugar en el municipio. Por otro lado, se considera un insumo de gran importancia para poder llevar a cabo medidas y acciones de manejo de los recursos y amenazas presentes en el municipio. Toda la información recopilada se muestra a modo de inventario o fichas de cada punto mostrando la ubicación y características de éstos. Las bases de datos se presentan en base Access a la vez integradas junto a las cartografías de puntos inventariados de las diferentes temáticas en SIG.

- **Inventario de puntos litológicos** es un insumo necesario para realizar una cartografía a detalle (E-1:25.000) de la zona Suroeste del municipio, necesaria a

la vez para la ampliación de conocimientos técnicos de las demás temáticas de estudio. La finalidad de la base de datos de los puntos litológicos tiene un especial carácter técnico. Este insumo sirve de base para la ubicación de puntos de interés en futuras investigaciones de diferentes disciplinas.

- **Inventario de puntos de agua** de la zona Suroeste del municipio, con el fin de caracterizar el recurso de agua disponible, su ubicación, cantidad y calidad. La ubicación y características hidrogeológicas de los puntos de agua es una herramienta técnica necesaria para la definición de los diferentes tipos de acuíferos, determinación del balance hídrico, etc. A la vez, presenta una aplicación a nivel local, ya que pretende ser insumo para las acciones recomendadas para un buen manejo y gestión de este recurso, como el mantenimiento y cuidado especial que requiere este vital recurso. Se complementa el inventario con la ubicación de diferentes focos de contaminación, puntos sobre los cuales deben también tomarse medidas de actuación.

- **Inventario de inestabilidades** con el fin técnico de caracterizar la tipología de los movimientos de ladera, su ubicación y relación entre los factores condicionantes y desencadenantes que dan lugar a la dinámica de los mismos. Más allá del estudio técnico, la base de datos queda a disposición para las próximas actuaciones en la zona, enfocadas a la prevención y gestión de riesgos, así como para contribuir al tan necesario registro histórico de los procesos geológicos que tienen lugar en el municipio.

- **Inventario de puntos críticos afectados por avenidas torrenciales** con el fin técnico de determinar las áreas afectadas por avenidas torrenciales, su magnitud y grado de amenaza, así como los elementos expuestos que pueden quedar afectados. Más allá del estudio técnico, la base de datos queda a disposición para las próximas actuaciones en la zona enfocadas a la prevención y gestión de riesgos, así como colaborar con registro histórico de áreas afectadas por esta amenaza.

Elaboración de cartografías temáticas, se realizan con el fin de mostrar gráficamente la distribución espacial de las características físicas, recursos y amenazas. La cartografía es una herramienta de gran utilidad para visualizar de manera simplificada las características físicas y procesos que tienen lugar en el municipio. Se han elaborado una serie de mapas, integrados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), para facilitar la compresión y manejo de la información: modelo de elevación, pendientes, orientaciones del terreno, geomorfológico, geológico, hidrogeológicos, puntos de interés (litológicos, de agua, contaminación, inestabilidades gravitatorias y avenidas torrenciales), procesos activos, áreas susceptibles a las inestabilidades o movimientos de ladera, áreas inundables y zonificación para la factibilidad de la ubicación de un relleno sanitario. Las principales cartografías se describen a continuación.

- **Cartografía geológica E-1:25.000 de la zona Suroeste.** Ante la carencia de un mapa geológico a mayor detalle que el existente a escala E-1:100.000 se definió la necesidad de la caracterización litológico-estructural de la zona Suroeste. Este insumo es necesario tanto para el estudio hidrogeológico como para la caracterización de amenazas y supone un importante aporte como cartografía geológica a E-1:25.000. Uno de los objetivos planteado a nivel nacional pretende cubrir todo el territorio de la República de El Salvador.

- **Cartografía de áreas inundables:** a partir del levantamiento de campo de las áreas inundadas en los diferentes eventos, fotografía aérea y en la medida de lo posible a partir de los caudales estimados para distintos periodos de retorno. Se presenta un mapa de donde se diferencian los diferentes grados de amenaza definidos según los diferentes escenarios planteados. Esta cartografía representa una herramienta básica para el ordenamiento territorial.

- **Cartografía de susceptibilidad a la inestabilidad gravitatoria:** a partir del levantamiento de campo de las zonas más afectadas, fotografía aérea y el análisis de los diferentes parámetros condicionantes. El mapa muestra los diferentes grados de susceptibilidad a partir de los cuáles se especifican las restricciones para cada grado. Esta cartografía representa una herramienta básica para el ordenamiento territorial.

- **Cartografías hidrogeológicas:** a partir del levantamiento de campo, medida de caudales, análisis químicos, balance hídrico, etc. Dichas cartografías son herramientas básicas para el conocimiento de las características del agua subterránea, por tanto indispensable para establecer un mejoramiento del manejo del recurso, así como también para el ordenamiento territorial.

- **Cartografía para determinar la factibilidad de un relleno sanitario**. Ante la necesidad de buscar una solución al manejo de desechos sólidos que tanto afectan el recurso subterráneo caracterizado, se han delimitado a partir de los diferentes factores físicos, las características hidrogeológicas y las áreas afectadas por los procesos de inundación e inestabilidadades gravitatorias. De esta manera queda caracterizado la totalidad del municipio ante la imposibilidad de la ubicación de dicha instalación.

Estudios de Caracterización, a partir de las componentes ya descritas, y el análisis y procesamiento de datos, se obtienen las diferentes caracterizaciones. La presente componente pretende ampliar los conocimientos de las características físicas del terreno y la interactuación de los diferentes procesos naturales que tienen lugar en el municipio. De esta manera se obtienen herramientas orientadas a la prevención de dichos fenómenos. Las caracterizaciones a detalle que componen el estudio son las siguientes.

- **Caracterización geológica**. Contextualiza a nivel regional y local la geología del municipio. La geología a detalle se centra en el estudio de la Zona Suroeste del municipio donde se describen los diferentes tipos de rocas, así como la tectónica regional y local. Se fortalece por las dos subcomponentes ya descritas: inventario de puntos litológicos y cartografía geológica E- 1:25.000 de la zona Suroeste.

- **Caracterización hidrogeológica**, con el fin de caracterizar los recursos hidrogeológicos (agua subterránea) de la zona Suroeste del municipio, en cuanto a su dinámica, balance hídrico, calidad de las aguas, etc. El estudio realizado sumado al inventario de puntos y las cartografías resultantes, pretenden constituir un insumo para el mejoramiento en la gestión del agua del municipio de Jucuarán.

- **Caracterización de avenidas torrenciales y análisis hidrometeorológico**, donde se determinan los diferentes grados o magnitudes de la escorrentía superficial, así como las áreas afectadas por eventos pasados y las posibles áreas de inundación. Por otro lado, con el fin de estimar la recurrencia de las avenidas torrenciales, los caudales asociados a las precipitaciones máximas y la capacidad de las quebradas a soportar estos caudales se realiza el análisis hidrometeorológico. Este estudio pretende determinar a partir una caracterización detallada de las diferentes subcuencas (superficie y forma de las subcuencas, longitud del cauce, jerarquía de los cauces,...) y el estudio de recurrencia de las diferentes magnitudes de la amenaza, las medidas de prevención para el diseño de un sistema de alerta temprana (SAT) que disminuya la vulnerabilidad y por tanto, el riesgo, de los habitantes de las principales áreas afectadas en el municipio.

- **Caracterización y análisis de susceptibilidad de inestabilidades gravitatorias,** a partir del trabajo de campo y determinación de los diferentes factores condicionantes de este proceso se presenta un análisis de susceptibilidad con su correspondientes cartografías. El análisis y cartografías de dicha amenaza constituyen una herramienta indispensable para el ordenamiento territorial.

Sensibilización, capacitación y divulgación; enfocados al manejo de los recursos, saneamiento ambiental y gestión de riesgos. Se han impartido talleres de sensibilización y capacitación junto al consorcio CODEI. Los talleres están siendo replicados por el CODEI en las comunidades del Comité Norte y Comité Sur del municipio de Jucuarán. Parte de esta componente ha tenido lugar en los espacios de organización fortalecidos y creados en el presente año: Mesa Sectorial de Gestión de Riesgos departamental y municipal, Coordinadora de Salud departamental y municipal, Comités de la zona Norte y zona Sur, etc.

Recomendaciones y liniamientos de actuación. A partir de los insumos generados, se presenta una serie de recomendaciones generales y particulares de acuerdo a cada componente de caracterización. Mediante estas recomendaciones y liniamientos se pretende incidir en la situación geológico-ambiental del municipio. Teniendo en cuenta que muchas de las recomendaciones tienen incidencia en los hábitos diarios de los pobladores, se pretende socializar y consensuar, en los espacios de organización existentes, las posibles soluciones y acciones para las diferentes problemáticas diagnosticadas.

2. METODOLOGÍA

Mediante este capítulo se pretende dar a conocer la metodología implementada en el presente estudio y los motivos por los que se ve necesario describir este proceso metodológico. En este aspecto, el bajo número de instituciones y profesionales en la rama de la geología con conocimientos técnicos para realizar este tipo de estudios, hace que este documento pretenda ser una herramienta útil y comprensible, de forma que se entiendan los diferentes pasos a seguir a la vez que aporte una calidad técnica que lo respalde. Así se ve reflejado en los diferentes tiempos de ejecución del proyecto, y en los resultados de la presente memoria. Con este fin creamos este medio de discusión e intercambio de conocimientos técnicos, teniendo en cuenta que pasará a formar parte de las herramientas del Servicio Nacional de Estudios Territoriales, institución que debe evaluar los resultados obtenidos.

La elaboración del presente estudio se ha desarrollado en tres fases. La primera fase, de preparación del proyecto, está centrada en la recopilación de la información existente y disponible, ya sea documental o cartográfica, así como una primera evaluación con los pobladores del municipio con el objetivo de identificar los procesos naturales que mayor afectación tienen en la vida de los jucuareños. Un análisis preliminar de la información existente da lugar a una segunda fase, donde se llevó a cabo el levantamiento de información primaria en campo junto a los pobladores con el objetivo de registrar los puntos y áreas de interés. Se realizaron también los talleres de sensibilización y capacitación a las comunidades junto al consorcio CODEI. Finalmente, la tercera fase se destinó al análisis de datos y al tratamiento en Sistemas de Información Geográfica de las cartografías geoambientales elaboradas. Esta fase se destinó también a la elaboración del informe o memoria del estudio y la presentación de resultados a los principales beneficiarios.

2.1.Preparación del proyecto

Durante este tiempo se realizaron diversas actividades de puesta en contacto con diversos organismos, recopilación de información y la elaboración de una metodología de trabajo.

En la preparación del proyecto se trabajó con la contraparte local CODEI a medida que se ponía en marcha el proyecto de Atención Primaria a la Salud (APS) en el que se enmarca el presente estudio. A pesar del retraso del APS se contactó con los Comités Norte y Sur con los que se organizó el levantamiento de campo.

Previo al levantamiento de campo se realizaron talleres participativos en los Comités Norte y Sur con el objetivo de obtener información de las zonas más afectadas por los diferentes procesos geológicos, movimientos en masa y avenidas torrenciales. La información previa al levantamiento de puntos de agua se obtuvo mediante entrevistas con varios pobladores integrantes de los comités.

Una vez iniciado el APS se coordinó principalmente las relaciones con los grupos focales que nacían de los esfuerzos del transcurso del proyecto: Coordinadora de Salud de Jucuarán, Mesa Sectorial de Gestión de Riesgo de Jucuarán (Municipal), y con la ya instalada Mesa Sectorial de Gestión de Riesgos de Usulután (Departamental; iniciativa del Consejo Departamental de Alcaldes de Usulután y CRS). También se realizaron Talleres de Sensibilización y Capacitación junto al equipo operativo del APS.

Dadas las circunstancias iniciales del proyecto, se priorizó la coordinación con las demás instituciones con las que Geólogos del Mundo gestionaba convenios de colaboración.

Entre estos se encuentra el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), institución comprometida a la absorción y seguimiento de los insumos generados en el presente proyecto, y que proporciona algunos insumos primarios para el estudio.

La coejecución del estudio hidrogeológico, formando parte del programa de Fortalecimiento Institucional de Aguas Subterráneas (FIAS), dentro del convenio COSUDE-ANDA, convenido en la etapa de formulación del proyecto, quedó reducido a la realización de sondeos eléctricos verticales (SEV) ya en la etapa final del proyecto. Los motivos fueron la reestructuración del plan de trabajo de FIAS, asumiendo Geólogos del Mundo los inconvenientes, y por tanto, adaptándose a los limitados tiempos y recursos.

Sujetos a los tiempos en los que se formalizaba el convenio con La Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA), y a la disposición de estudiantes en sus horas sociales, la UCA colabora en la fase final de proyecto en la digitalización de algunas cartografías y en la edición de todos los mapas generados.

La coordinación con instituciones que trabajan en la zona, FENACOA, CRS y CODECOSTA, se estrecha a medida que se consolida la Mesa Sectorial de Gestión de Riesgos de Jucuarán.

En cuanto a la recopilación de información se tuvo como objetivo la obtención de bibliografías temáticas (sobre aspectos referentes al estudio, así como otro tipo de información socio-económica de las áreas de ejecución del proyecto), datos de precipitaciones, datos sísmicos, fotografías aéreas y mapas topográficos.

La escala de detalle y calidad de los diferentes registros recopilados no dan lugar a una evaluación de las diferentes componentes del riesgo, como son la peligrosidad,

exposición y daño de manera cuantitativa. Sin embargo, el presente estudio es un paso importante a la hora de tener indicadores de riesgo para retomar y cuantificar esta componente. La ausencia de registros específicos relacionados con la gestión del riesgo por parte de instituciones gubernamentales locales y nacionales, nos indica la falta de preparación y prevención en este aspecto.

Se elaboró paralelamente una metodología de trabajo, definida tanto para la toma de datos, como para el trabajo de campo y el procesamiento de dichos datos. Se establecieron así unos modelos para el levantamiento de campo de datos litológicos, puntos de agua, puntos de contaminación, inestabilidades gravitatorias o movimientos en masa, y áreas inundables; definiendo la información necesaria a recopilar para la caracterización del recurso hídrico y la caracterización de los riesgos geológicos del municipio.

2.2. Trabajo de campo

La extensión del municipio, con más de 223 km^2, obligó, por razones de operatividad y tiempo, a trazar itinerarios centrándose en las zonas de interés de las diferentes temáticas. Concretamente para el estudio geológico e hidrogeológico el área atendida, zona Suroeste del municipio, abarca 95,5 km^2.

Durante el trabajo de campo se ha levantado la información necesaria para el análisis técnico, en el que se contempla la realización de una base de datos de inventarios y cartografías de las diferentes temáticas.

En los diferentes inventarios de puntos de interés, en las cartografías y en el inventario fotográfico, queda reflejado el estado en que se encuentran estas zonas en el momento de la realización del presente estudio, permitiendo, de esta manera, la realización de un seguimiento de su evolución, así como las actuaciones recomendadas a partir de los resultados del estudio.

Paralelo a los trabajo de campo podemos contemplar los diferentes talleres de sensibilización y capacitación realizados en las comunidades pertenecientes a los comités.

2.3. Procesamiento de datos

A partir del análisis de la información hidrogeológica recopilada en diversa documentación, y de aquella recogida en campo o procedente de ensayos, se han descrito las formaciones hidrogeológicas, además de caracterizar los distintos acuíferos desde el

punto de vista hidrodinámico, calcular el balance del acuífero principal y definir las características hidrogeoquímicas de las aguas.

El procesamiento de datos de las amenazas se ha centrado en el análisis de los distintos factores que van a condicionar los riesgos estudiados, ya sean riesgos relacionados con los movimientos de ladera como por avenidas torrenciales. Igualmente, se ha analizado la forma en que éstos interactúan y se han elaborado cartografías de los mismos, quedando integrados en SIG y dando lugar, o contribuyendo, al desarrollo de los mapas de susceptibilidad y peligrosidad a los movimientos de ladera y áreas inundables por avenidas torrenciales.

Se ha llevado a cabo, además, un detallado análisis de las precipitaciones y un estudio hidrometeorológico, conducentes a la estimación de los ciclos o recurrencia de las máximas precipitaciones, de los caudales esperados para distintos periodos de retorno y a la determinación, junto con los trabajos de campo, de las áreas inundables.

2.3.1. Caracterización de las formaciones hidrogeológicas

A partir de los datos recopilados de la geología superficial vista en campo, series o columnas levantadas en campo, sondeo de un pozo, cortes geológicos y sondeos eléctricos verticales (SEV) se llega a una interpretación de la estratigrafía de la zona Suroeste del municipio.

2.3.2. Hidrodinámica

A partir de los puntos de agua inventariados en campo y de las medidas de los niveles de agua, se ha interpretado la dinámica de los acuíferos superficiales de la zona Suroeste del municipio (profundidad del agua, dirección del flujo natural, influencia de los pozos). No obstante, dichas interpretaciones se ven limitadas por falta de datos a mayor profundidad, ya que todos los pozos de la zona son poco profundos, y no existen estudios anteriores. Se puede decir que éste es el primer estudio realizado en el municipio de Jucuarán.

2.3.3. Balance hídrico

Para calcular el balance hídrico es necesario definir, en primer lugar, los límites del acuífero. Posteriormente deberán calcularse las entradas y salidas de agua. Las entradas al acuífero se producen por la infiltración de agua de lluvia y reinfiltración de aguas de manantiales o surgencias. Las salidas del acuífero son: la extracción para abastecimiento

urbano, salida a través de manantiales y salida directa al mar o por el límite de caudal constante.

Las salidas al río y a otro acuífero se han calculado a partir de la piezometría. Las salidas por bombeos se han obtenido atribuyendo un consumo de 50 l/hab./día, teniendo en cuenta los habitantes que usan los pozos y manantiales de la zona de las quebradas.

Por otro lado, el cálculo de la infiltración por precipitación se ha basado en el método usado por Duarte (1998). Para la obtención de este parámetro es necesario el índice de infiltración, que se ha obtenido, en parte, a partir de valores proporcionados por ANDA-PNUD (1972) y, en parte, mediante su cálculo a partir de la capacidad de infiltración procedente de valores obtenidos por Duarte (1998) con el método Porchet. El producto del índice de infiltración y las precipitaciones medias mensuales, proporcionarán el valor de la precipitación efectiva. Este valor es necesario junto con los valores de evapotranspiración (proporcionados por las estaciones meteorológicas) y contenido en humedad del suelo para calcular la recarga del acuífero, basándose en el método de Penmann y Grindley. Los limitantes para el balance hídrico han sido el no poder realizar pruebas de infiltración y humedad del suelo en campo, y tener que usar datos correspondientes a otras partes del país.

A partir de todos los parámetros calculados, se realizará el balance de masas final, igualando las entradas y las salidas, obteniendo así, la variación del almacenamiento.

2.3.4. Hidroquímica

Un completo estudio de calidad de aguas subterráneas se contempla realizarlo el próximo año 2004, con la instalación de un laboratorio de aguas por parte del APS en el Sistema Básico de Salud Integral (SIBASI) de Usulután. Sin embargo, se ha analizado parte del quimismo de las aguas subterráneas de la zona Suroeste del municipio, basado en los análisis de aguas recopilados, así como en los análisis físico-químicos efectuados para este proyecto a partir del muestreo de algunos puntos de agua. A partir de esta caracterización se analiza la potabilidad del agua, desde el punto de vista físico-químico en base a algunas reglamentaciones sobre aguas potables existentes (OMS, norma española y salvadoreña), y su origen y evolución en su paso a través de las formaciones rocosas.

2.3.5. Zonificación para la factibilidad de la ubicación de un Relleno Sanitario

Uno de los objetivos del estudio hidrogeológico era la viabilidad de poder construir un relleno sanitario en el municipio de Jucuarán. Los resultados obtenidos en el estudio geológico e hidrogeológico muestran una inviabilidad para realizar este proyecto por tratarse

de un municipio muy accidentado, con pendientes elevadas, sistemas de fallas y multitud de quebradas. Las zonas llanas, están afectadas por las áreas de inundación del Río Grande de San Miguel, zona de manglares y esteros, y desagüe de las quebradas. Además, la accesibilidad a la mayoría del territorio es complicada. En definitiva, no existe ninguna zona apta dentro del municipio, para la construcción del vertedero de residuos sólidos urbanos.

2.3.6. Susceptibilidad a la inestabilidad gravitatoria

La susceptibilidad a los movimientos de ladera es la mayor o menor tendencia a que se genere una inestabilidad gravitacional en una zona específica, en función de unos factores condicionantes. Por lo tanto, es una herramienta de predicción espacial, aunque no temporal.

Para establecer los distintos rangos de susceptibilidad se hace necesaria la realización de un análisis de la amenaza existente, debiendo determinarse cuáles son los factores condicionantes de la ocurrencia de movimientos gravitatorios.

En la realización del mapa de susceptibilidad a las inestabilidades de ladera se integrarán mediante SIG las cartografías elaboradas para cada uno de los factores condicionantes, dándoles un peso diferente en función de la información recopilada y las observaciones de campo realizadas.

2.3.7. Peligrosidad por inestabilidad gravitatoria

La peligrosidad es la condición, proceso o suceso geológico que supone una amenaza para el ser humano o su hábitat, en definitiva para la salud, seguridad o bienestar de un grupo de ciudadanos o la economía de una comunidad (UGSS,1977). Es función, por tanto, de la amenaza, como proceso que puede generar daño, y de la probabilidad de ocurrencia o frecuencia del fenómeno. Para determinar esta probabilidad de ocurrencia se debe establecer el tiempo de retorno de los factores desencadenantes.

En la determinación de la peligrosidad de las inestabilidades de ladera en el municipio de Jucuarán, se debería establecer el periodo de retorno de sismos y precipitaciones sobre un registro mínimo. Para ello, se ha de tomar un valor tanto de intensidad de precipitaciones, como de magnitud de sismos, a partir del cual se pueden producir las inestabilidades, y obtener el tiempo de retorno de dichas intensidades y magnitudes. Debido a la dificultad que supone establecer estos rangos y periodos de retorno combinados para ambos factores, y a la escasez de registros disponibles, no se ha elaborado el mapa de peligrosidad.

No obstante, se ha empleado el método de Mora y Varhson (1993) como aproximación a un estudio de peligrosidad, dado que este método tiene en cuenta factores desencadenantes como las precipitaciones y los sismos, principales generadores de las inestabilidades de ladera en el municipio de Jucuarán. Dicho método no tiene en cuenta, sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de tales fenómenos, ni

sus tiempos de recurrencia, considerando, en cambio, los máximos eventos registrados, por lo que podría tomarse como una evaluación de la peligrosidad para un máximo periodo de retorno dentro del registro histórico.

2.3.8.Susceptibilidad a inundaciones y avenidas torrenciales

La susceptibilidad a sufrir inundaciones y avenidas torrenciales es la tendencia de las cuencas y cauces a concentrar una elevada cantidad de agua y material sólido de forma que se produzcan desbordamientos.

Para establecer la susceptibilidad estudiaremos las características intrínsecas de la red de drenaje como factores condicionantes, además de valorar usos del suelo y actuaciones antrópicas.

2.3.9. Peligrosidad por inundaciones y avenidas torrenciales

Según la definición dada de peligrosidad, para la estimación de este parámetro debe determinarse la probabilidad de ocurrencia de la amenaza de avenidas e inundaciones, estableciendo el tiempo de retorno de los factores desencadenantes, siendo el principal las precipitaciones. Para ello, se ha realizado un estudio probabilístico de las mismas.

Al igual que para la caracterización de las inestabilidades ha surgido la problemática de la ausencia de un registro suficientemente completo. Por esta razón, se ha trabajado con los datos existentes aún sabiendo que pueden no representar fielmente las condiciones del área. A partir de los datos de precipitación estudiados, se han obtenido las principales recurrencias de las máximas precipitaciones, y caudales asociados a estas lluvias, para distintos periodos de retorno. Para ello, se ha empleado un método de precipitación-escorrentía de uso común, el método racional modificado por Témez en 1999. En éste, nos basamos en las precipitaciones máximas diarias para calcular los periodos de recurrencia de las precipitaciones más altas esperadas.

E n el mapa de áreas inundables se han definido diferentes escenarios mediante la información facilitada por los habitantes de las comunidades, observaciones de campo, fotografía aérea y el mapa topográfico. Por lo tanto la metodología empleada para el análisis de cada quebrada ha variado en función de las características de las mismas y de la disponibilidad de datos facilitados por la población. Por otro lado, a pesar de contar con un estudio probabilístico que aporta los caudales esperados para distintos periodos de retorno, no se han podido definir cartográficamente las zonas inundables para cada uno de estos periodos, debido a que no se ha podido disponer de una topografía a escala más detallada, necesaria para diferenciar las áreas de inundación en función del tiempo considerado.

3. MARCO GEOGRÁFICO, POLÍTICO-ADMINISTRATIVO Y SOCIO-ECONÓMICO

En el presente capítulo se realiza una ubicación de la zona de estudio en su contexto regional, una división político administrativa y una situación socioeconómica.

3.1. Contexto geográfico

Jucuarán se emplaza en la Cordillera de Jucuarán-Intipucá, con una elevación máxima de 883 m en el Cerro el Monito. Esta cordillera se alza entre la llanura mareal de la Bahía de Jiquilisco, en la que desemboca el río Grande de San Miguel y la llanura aluvial situada entre los 30 y 65 metros sobre el nivel del mar en la que se extienden las lagunas del Jocotal y de Olomega, siendo este mismo río el que riega al norte y al noreste la cordillera, ya en el departamento de San Miguel.

Esta cordillera forma el extremo oriental de la unidad geográfica de las Montañas Costeras, unidad definida por tres bloques que se destacan sobre la planicie costera (Apaneca, Bálsamo y Jucuarán) y que se pueden individualizar de la cadena de volcanes recientes situados ligeramente más al norte. En el caso de la Cordillera de Jucuarán esta unidad emerge bruscamente del mar en su lado meridional separándose de éste hacia el este y el noroeste. El límite norte lo constituye un farallón de falla que la separa de la Fosa Central *(Geografía de El Salvador, 1986)*.

3.2. División político-administrativa

El territorio que comprende La República de El Salvador se ubica sobre el litoral del océano Pacífico de América Central con una extensión actual de 20.749 km^2. Limita al norte y al oeste con Guatemala, al norte y al este con Honduras, y al sur con el Océano Pacífico.

El país está dividido politico-administrativamente en 14 departamentos, con una población estimada de 7 mill de habitantes (2,5mill residiendo en el extranjero), siendo el país de mayor densidad de población de Centroamérica (280habitantes/km^2).

El municipio de Jucuarán se ubica en el departamento de Usulután a 127kms al sureste de la capital y a 37kms de la cabecera departamental (Usulután). El departamento de Usulután, con una extensión de 2130 km^2, limita al oeste con el departamento de San Vicente y con el departamento de San Miguel al este y al norte *(ver Anexo 1: Mapas; "Localización Geográfica")*

Se divide en 23 municipios, siendo el municipio de Jucuarán el segundo más extenso.

Extensión geográfica	**Area (km^2)**	**Perímetro (km)**
Departamento Usulután	1871,59	787,9
Municipio de Jucuran	223,71	44,78

El municipio de Jucuarán, con una de las mayores extensiones de los municipios que comprende el departamento (223,7 km^2), colinda al norte con el municipio de Concepción Batres, departamento de Usulután y al oriente con el municipio de Chirilagua, departamento de San Miguel. Su población es de 11.196 habitantes.

Jucuarán se divide en siete cantones que a la vez se dividen en comunidades. *(ver Anexo 1: Mapas; "Localización Geográfica")*

Cantones	**Area (km^2)**	**Perímetro(km)**
El Zapote	65,32	44,78
El Llano	26,95	27,27
El Jícaro	25,70	42,52
Samuria	41,22	30,87
El Jutal	25,06	32,24
El Progreso	8,10	14,5
La Cruz	13,88	17,99

3.3. Situación socioeconómica

Los riesgos geológicos, tales como sismicidad, inestabilidades gravitatorias o inundaciones, así como contaminación de suelos, del agua superficial y subterránea suponen una amenaza potencial para las personas y los bienes materiales (viviendas e infraestructuras) que viven o se ubican en aquellos lugares con mayor probabilidad de que estos procesos o situaciones ocurran. Si revisamos el concepto de riesgo, hablamos de vulnerabilidad de la población afectada como actor principal, ya que si no existe una

población y sus bienes allá donde se dan los procesos que amenazan, el riesgo el nulo. Por este motivo, es fundamental considerar el factor socio-económico en todo estudio geoambiental, analizando sus características para conocer el grado de vulnerabilidad frente a estos procesos y poder plantear las actuaciones más adecuadas para su tratamiento y protección.

Por otro lado, aunque la problemática asociada a dichos procesos sólo afecte directamente a determinadas áreas o a parte de la población, las consecuencias de los mismos afectan a la totalidad del municipio y de forma general afectación a nivel departamental incluso nacional.

Otro de los factores a tener en cuenta en la evaluación de los riesgos naturales, es el factor antrópico. El hombre interviene de una manera importante en estos procesos, ya que el manejo inadecuado de los recursos constituyen un factor agravante o desencadenante de los mismos.

La información de las características poblacionales y socio-económicas del área de estudio es aportada por recientes trabajos elaborados para el municipio: “Salud Jucuaran 2000-2001-Diagnostico Sociosanitario” (2001). La información existente se completó con datos de campo tomados paralelamente a la realización de los estudios geológicos. Estos datos se han recopilado de diferentes fuentes (unidades de salud, instituciones no gubernamentales, etc.) y servirán como insumo a la hora de realizar un análisis de riesgo del municipio en futuros estudios. Adelantando acontecimientos, se trabaja en la determinación de indicadores de riesgo que se incluirán en el estudio socio-económico que realizará el CODEI en el próximo año 2004.

Para contextualizar las diferentes situaciones de riesgo y el manejo de los recursos de los habitantes del municipio, cabe decir que nos encontramos ante un municipio con muy pocos recursos (media de ingresos por familia no supera los 80$), donde la agricultura y la pesca artesanal son las principales fuentes de ingresos, o medio de supervivencia, y donde la vivienda es muy vulnerable ante cualquier evento natural, por su ubicación y por su construcción. Otro factor importante es la salud, donde no se cubren las necesidades mínimas de atención. En cuanto a los servicios, comunicaciones, sistema vial y de transporte, podemos decir que se encuentran atendiendo de forma deficitaria las necesidades de un municipio tan grande y con esta población.

4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

4.1. Climatología

4.1.1. El clima en El Salvador

Desde el punto de vista climatológico, El Salvador se encuentra situado en la parte exterior del Cinturón Climático de los Trópicos, caracterizado por tener unas propiedades térmicas casi constantes durante todo el año y dos estaciones muy marcadas, una lluviosa y otra seca. Las precipitaciones se concentran casi exclusivamente durante la estación lluviosa, si bien, dentro de ella pueden aparecer grandes oscilaciones. Sus valores máximos suelen darse unas semanas después del paso del sol por su cenit.

La estación seca se presenta durante los meses de noviembre a abril, con las máximas temperaturas al final de la misma, en el mes de abril, antes del comienzo de la estación lluviosa.

Otra característica del clima en este país son los Alisios, vientos predominantes de rumbo aproximando NE; y los Nortes, que transportan aire frío procedente del Ártico hacia los trópicos. Se puede observar, también, un buen desarrollo del sistema que lleva aire del mar hacia tierra y sus zonas inmediatas.

Con los datos obtenidos a lo largo de más de 50 años se han podido establecer unas fechas promedio para el comienzo y el final de las dos estaciones, así como para los intervalos de transición que hay entre ellas *(Tabla 4.1)*

Época del año	Principio	Final	Días
Estación seca	14-Nov	19-Abr	157
Transición seca-lluviosa	20-Abr	20-May	31
Estación lluviosa	21-May	16-Oct	149
Transición lluviosa-seca	17-Oct	13-Nov	28

Tabla 4.1. - Duración aproximada de las estaciones.

Con el fin de comprender con mayor claridad el estudio hidrometeorológico que se realiza en el *apartado 8.4* se ha hecho un resumen de los principales acontecimientos climáticos que tienen lugar en cada mes del año.

Enero

Es el mes más frío del año. Los vientos boreales, “Nortes”, que hacen su aparición en los últimos días de octubre, al debilitarse temporalmente, son causa de que, “al día siguiente”, se produzcan las temperaturas más bajas del año. Estos enfriamientos extremos llamados “heladas” son causa de que los cultivos de café sufran cuantiosos daños en esta época.

En la capital, San Salvador, la temperatura ha llegado a alcanzar valores de hasta 8ºC. En general, durante el día, el tiempo es predominantemente soleado y fresco, tornándose más frío durante la noche.

Febrero

Después de haberse alcanzado los valores mínimos de temperatura en enero, durante este mes se inicia un gradual ascenso de la misma. Los vientos “Nortes” son menos frecuentes y los últimos días de febrero marcan el inicio de la segunda parte de la estación seca, que prevalecerá durante los meses de marzo y abril. Este segundo tramo de la estación seca tiene en común con el primero (de noviembre a enero), la ausencia casi absoluta de lluvias, pero se diferencia en su comportamiento térmico, ya que los días comienzan a ser un poco más calurosos durante las horas de mayor insolación y las noches son cada vez menos frías.

Marzo

Lo característico de este mes es el alto grado de turbidez de la atmósfera, producto de la influencia de la inversión de los Alisios (capa bloqueante entre los 2.000 y 3.000 metros de altitud) que permite, por debajo de ella, la concentración de bruma seca, polvo y humo. El humo procede principalmente de las “quemas” (prácticas de cultivo inapropiadas por su efecto posterior de erosión y pérdida de suelo) que, anticipándose a la ya próxima estación lluviosa, realizan los agricultores como preparación de la tierra para el cultivo. La concentración de bruma llega a tales extremos que el Sol se muestra frecuentemente como un disco de color rosado.

Abril

En la segunda mitad de este mes comienza, en la mayor parte del país, la transición de la estación seca a la lluviosa. El desarrollo de la nubosidad, ausente durante los meses anteriores, empieza a manifestarse, principalmente en las horas anteriores al mediodía. Los primeros relámpagos en el norte durante la noche, señalan el inicio de esta transición. Normalmente, el mes registra de 4 a 5 días con lluvia. La variabilidad de las cantidades de

lluvia caída durante el mes es muy grande, ya que ha habido años donde no se ha registrado ninguna precipitación y otros en los que se han alcanzado hasta 525 mm.

Mayo

Comienza la estación lluviosa asociada a las “Ondas de los Estes”, zonas de fuerte inestabilidad que se trasladan de este a oeste atravesando el país y generando tormentas eléctricas y lluvias en forma de chubascos y aguaceros. La estación lluviosa comienza en la región sur oriental dos o tres semanas más tarde que en la zona central y noroccidental. Esto tiene que ver con la disposición de los sistemas montañosos, que favorecen las lluvias por el ascenso orográfico en las dos últimas regiones. En los primeros quince días del mes, las Ondas de los Estes aún no se presentan perfectamente definidas y toda la lluvia, en este período, es marcadamente orográfica.

Junio

En junio se produce el primer máximo de actividad lluviosa. Las lluvias, que en mayo son atribuibles a la influencia de las Ondas de los Estes, en junio se ven incrementadas por el fenómeno de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La ZCIT efectúa su primera incursión en este mes, propiciando las situaciones atmosféricas llamadas “temporal”, caracterizadas por lluvias no tan intensas, pero de carácter intermitente, teniendo lugar a cualquier hora del día. Dichas lluvias se presentan asociadas a nubes opacas, de tipo estratiforme, cuya base se ubica a muy poca distancia del suelo (hasta 300 metros). Las situaciones de temporal pueden tener una duración de hasta 6 días.

La temporada de huracanes se inicia coincidiendo con el primer máximo de precipitaciones, el primero de junio, y dura hasta el treinta de noviembre. La ocurrencia de los huracanes no sigue un patrón fijo sino que presenta una gran variabilidad a lo largo de toda la temporada y de un año respecto a otro.

Estas pautas meteorológicas se ven trastornadas por el efecto de “El Niño” y “La Niña”. En 1997-1998, por ejemplo, estos fenómenos ocasionaron un retraso en la aparición de la estación lluviosa, que se tradujo en unos meses de junio y septiembre anómalamente secos, mientras que los meses de julio, agosto y octubre presentaron un elevado registro de precipitaciones respecto a las medias anuales. A estos desordenes climatológicos hay que sumar la aparición, a finales de octubre de 1998 del huracán Mitch que vino a multiplicar las pérdidas ocasionadas por la sequía con unas lluvias desmesuradas ocurridas a destiempo.

Julio

Las lluvias, en este mes, comienzan a ser menos frecuentes durante las horas diurnas, concentrándose preferentemente en las horas nocturnas.

En la mayor parte del país, las cantidades de precipitación son generalmente menores a las registradas durante el mes de junio, debido aparentemente al alejamiento de la Zona de Convergencia Intertropical.

A partir de la segunda semana de julio se manifiestan frecuentemente “canículas”, que son periodos de días soleados, sofocantes y sin registros de actividad lluviosa. La citada interrupción, también típica de otros países situados más hacia el Ecuador, contribuye a la reducción de las precipitaciones observadas en julio.

Agosto

En agosto las lluvias continúan concentrándose en las horas nocturnas y se considera normal también que las “canículas” hagan acto de presencia en el transcurso de dicho mes. Al igual que en julio, el régimen de lluvias está regulado por la presencia y paso de las Ondas de los Estes sobre el país y por las canículas.

Septiembre

Este mes es normalmente el más copioso del año. De nuevo las Ondas de los Estes y la Zona de Convergencia Intertropical se combinan para favorecer la presencia de lluvias a cualquier hora del día. El hecho de que septiembre sea más copioso que junio (mes en el que se produce otro máximo de lluvia), puede deberse a que la ZCIT se encuentra mucho más cerca en septiembre que en junio. Esto permite que alcance con más facilidad la región costera del Pacífico y, por tanto, proporcione precipitaciones de mayor “amplitud”, manifestándose así los “temporales”. Las grandes cantidades de precipitación son la causa del desbordamiento de los ríos con las consecuentes inundaciones que afectan principalmente a toda la zona costera del país.

Octubre

En el mes de octubre se inicia la transición de la estación lluviosa a la seca. La forma en que se inicia dicha transición viene explicada por la primera incursión de una célula de alta presión procedente de América del Norte. El sistema de circulación asociado a dicha célula, que permita el transporte de una masa de aire frío y seco hacia nuestras latitudes, determina que sobre El Salvador se inicien los primeros Nortes con intensidades débiles a moderadas (de 10 a 30 km/h). Dichos sistemas de alta presión anulan la actividad lluviosa, ya que restringen, por efecto de la circulación, la génesis de las Ondas de los Estes, secando el aire e impidiendo los procesos de condensación y formación de nubes.

Noviembre

La estación seca, propiamente dicha, suele comenzar en la mayor parte del país en los primeros días de noviembre, atrasándose hasta unos 15 días en el extremo oriente del país y en el Golfo de Fonseca. Los “Nortes”, que normalmente caracterizan los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, pueden soplar hasta 15 días o más, sin interrupción, alcanzando velocidades de más de 100 km/h en las zonas montañosas.

Este mes marca el inicio de la primera parte de la estación seca (de noviembre a enero), que se caracteriza por la ausencia casi absoluta de lluvias y por la disminución paulatina de la temperatura, empezando a ser los días cada vez más frescos.

Diciembre

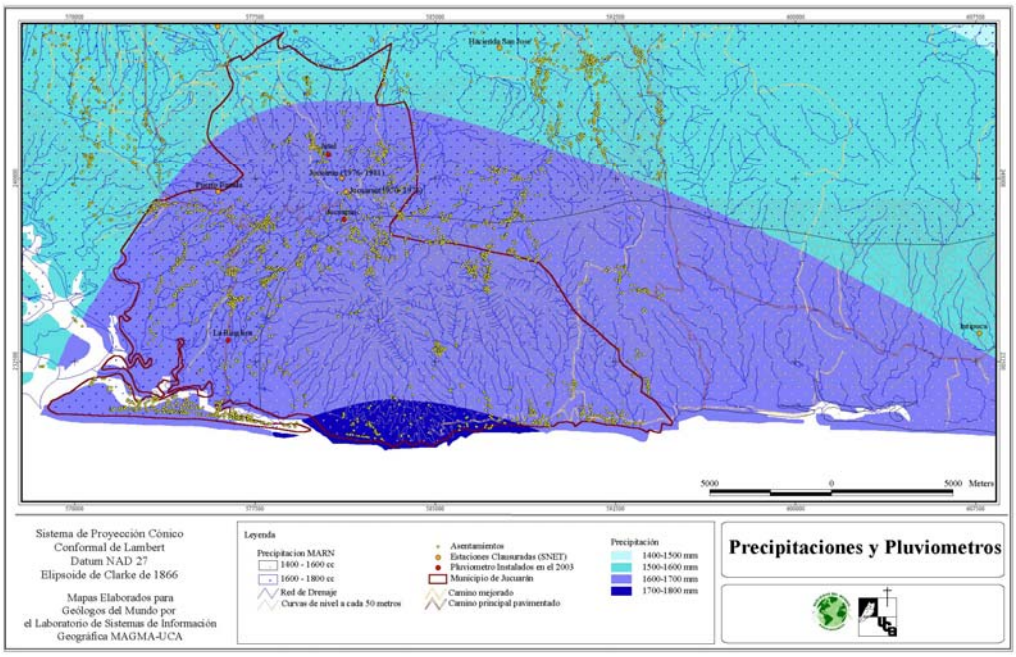
Este mes se caracteriza por cielos completamente despejados, ambiente muy fresco y agradable. Los “Nortes” continúan manifestándose de moderados a fuertes. Muy raramente se producen chubascos aislados (una o dos veces al mes), y su ocurrencia se atribuye a las influencias de frentes envejecidos que arriban al país de forma discreta.

4.1.2. Comportamiento de la precipitación en El Salvador

La lluvia en El Salvador, como característica de los países tropicales, muestra grandes variaciones de un lugar a otro y amplias oscilaciones a través del tiempo.

La actividad lluviosa empieza en el oeste y norte del país y termina en el este. En la segunda mitad de julio y sobre todo en agosto, muchas veces hay una disminución de las lluvias (canículas) que aparentan una segunda estación seca que no puede desarrollarse completamente. Este fenómeno ocurre en la zona oriental donde por lo general todos los años los agricultores pierden un porcentaje de las cosechas, principalmente de granos básicos.

Dentro de las zonas limitadas por el valor acumulado anual de lluvia, el municipio de Jucuarán se encuentra entre los valores de 1500mm y 1800mm, correspondiendo los más bajos al norte y los más altos al sur. *(ver mapa de Precipitaciones y Pluviómetros)*



4.1.3. Análisis de precipitaciones

El estudio de las precipitaciones es de vital importancia en la evaluación y predicción de la amenaza natural del área de estudio, ya que es uno de los principales factores desencadenantes de los procesos de erosión, desbordamiento e inundación en el municipio de Jucuarán. Para ello, es necesario tener información sobre la magnitud de las precipitaciones ocurridas en el pasado y sobre los fenómenos meteorológicos que las producen.

En El Salvador se producen tres tipos principales de lluvias asociadas a otras tantas situaciones climáticas:

- El desarrollo de tormentas locales por movimientos de aire convectivos debidos al calentamiento del aire húmedo del océano a lo largo del día y que, en la estación lluviosa (mayo-septiembre), suelen dar como resultado la precipitación de grandes cantidades de agua en poco tiempo, o lo que es lo mismo, precipitaciones de alta intensidad.

- Los eventos meteorológicos asociados a la presencia continuada de bajas presiones atmosféricas, situaciones ciclónicas debidas a la zona de convergencia tropical (Perla, Alfaro y Domínguez, 1990), ocasionan periodos de lluvias prolongados en el tiempo, con duraciones de varios días que, en general, ocasionan grandes precipitaciones, pero de baja intensidad relativa.

- Situaciones especiales de circulación transitoria de aire tropical, con la formación y entrada de fenómenos ciclónicos generados en el mar Caribe, que pueden dar lugar a lluvias intensas durante varios días, como fue el caso del huracán Mitch.

En el presente proyecto se ha realizado un análisis de las precipitaciones que se producen en la zona que abarca el municipio de Jucuarán, en base a datos históricos de lluvia recogida en 5 pluviómetros, 4 de los cuales no se encuentran dentro de los límites administrativos del municipio por no existir otras estaciones disponibles (Hcda. San José, Hcda. El Cañal, Puerto Parada e Intipucá). Sin embargo, su ubicación en la zona costera y a altitudes similares a las del municipio, las hace representativas.

La nomenclatura y coordenadas de las estaciones quedan recogidas en la *tabla 4.2*; *(ver mapa de Precipitaciones y Pluviómetros)*

Estaciones	m.s.n.m	Coordenadas	
		Latitud Norte	Longitud oeste
Jucuarán 1970-1976	650	13º15.2'	88º14.7'
Jucuarán 1976-1981	764	13º15.5'	88º14.8'
Hcda. San José	45	13º18.4'	88º11.2'
Hcda. El Cañal	30	13º18.9'	88º17.6'
Puerto Parada	2	13º15.2'	88º26.6'
Intipucá	110	13º12.0'	88º0.3'4"

Tabla 4.2. – Estaciones con datos históricos analizados en el estudio.

La serie de precipitaciones más larga pertenece a la Hcda. El Cañal, con 12 años de registro, seguido de Jucuarán con 11 y la Hcda. San José con 10, sin contar ninguna con un registro completo *(Tabla 4.3)*

Estaciones	Años de registro continuo
Jucuarán	Desde 1971 a 1981 – 11 años
Hcda. San Jose	Desde 1970 a 1979 – 10 años
Hcda. El Cañal	Desde 1970 a 1981 – 12 años
Puerto Parada	Desde 1969 a 1976 – 8 años
Intipucá	Desde 1971 a 1976 – 6 años

Tabla 4.3. – Series de precipitaciones disponibles con registro continuo.

El año de partida es 1969 correspondiente a la estación de Puerto Parada y se acaba el registro en 1981 con los datos de la estación de Jucuarán. Esto hace un total de 13 años, insuficiente para un análisis fiable de las precipitaciones, como veremos en el *apartado 8.3.*

A partir de ellos se han obtenido los datos anuales, mensuales y máximos diarios realizando un análisis de las series con el fin de obtener un estudio en conjunto de las precipitaciones del área del municipio de Jucuarán. Toda la información ha sido introducida en una base de datos Excel para su tratamiento posterior.

Precipitaciones anuales

Las precipitaciones anuales acumuladas, recogidas en el período de tiempo entre 1969-1981, han sido representadas en la *figura 4.1* a partir del tratamiento de los datos elaborados. En ella se observa que las precipitaciones anuales oscilan entre los 1.000 y los 2.500 mm en el conjunto de las estaciones, con una media de 1800mm.

Las precipitaciones a lo largo del tiempo siguen un patrón oscilante, diferenciándose dos picos, uno en 1973 y otro en 1979. En éstos se alcanzan precipitaciones cercanas a los 2500 mm en el primero y 2000 mm en el segundo. Entre ellos existe un mínimo donde las precipitaciones rondan los 1000 mm en 1977.

La carencia de más registros nos hace imposible determinar si la frecuencia de estos valores se ha mantenido más o menos constante. Esto nos permitiría determinar ciclos de carácter global en el municipio donde se podrían esperar años más lluviosos y otros más secos, siempre intentando prevenir situaciones de sequía o avenidas.

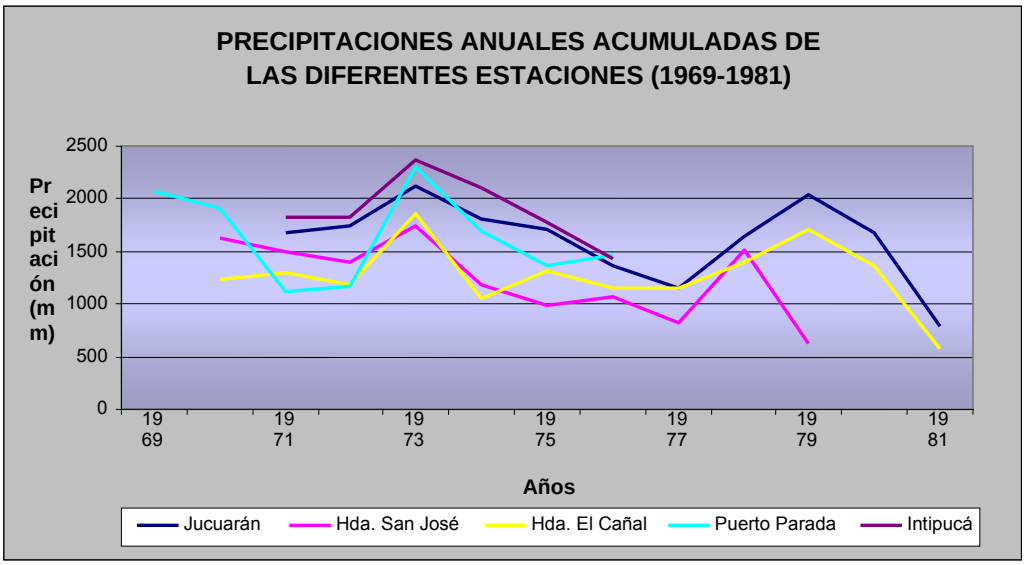


Figura 4.1. – Evolución de las precipitaciones anuales acumuladas entre 1969 y 1981.

Precipitaciones mensuales

Las máximas precipitaciones mensuales se concentran en la estación húmeda, que abarca los meses de mayo a noviembre, mientras que en el resto de los meses, la precipitación es escasa o nula.

En la *figura 4.2* se ha representado la distribución de lluvias mensuales medias a partir del tratamiento de los datos diarios registrados en cada estación durante las series anuales disponibles. Se observa claramente esta distribución estacional, siendo en los meses de junio y septiembre donde se registran las máximas precipitaciones, con una disminución marcada en julio. Las lluvias recogidas durante los meses más lluviosos oscilan

entre los 200 mm y 450 mm, siendo la estación de Intipucá la que presenta valores más altos de precipitación.

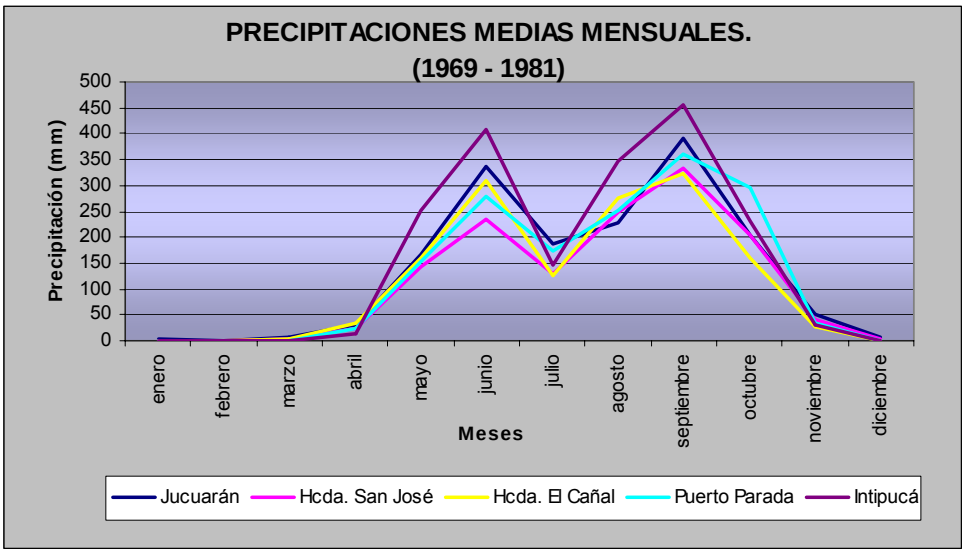


Figura 4.2. – Precipitaciones medias mensuales entre 1969 y 1981.

Si comparamos las medias mensuales con las precipitaciones máximas mensuales vemos como hay una gran diferencia en los valores obtenidos para cada mes *(figura 4.3)* En el caso de septiembre hay una diferencia de 350 mm, la mayor contrastada, sirviéndonos como ejemplo de la variabilidad de las lluvias en un mismo mes.

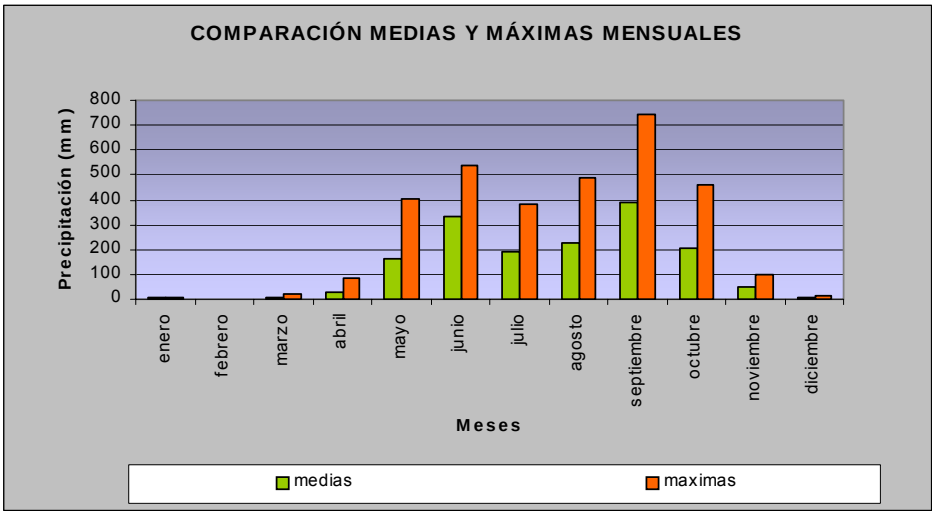


Figura 4.3.- Comparación de medias y máximas mensuales.

Precipitaciones diarias

Las precipitaciones diarias, más concretamente su intensidad, son las que van a condicionar la ocurrencia o no de la amenaza de inundaciones determinando su magnitud.

Debido a la ausencia de datos disponibles de intensidades horarias se ha recurrido a procesar las precipitaciones diarias acumuladas. Considerando éstas, así como la tipología de lluvias características de la región y los datos facilitados de forma directa por parte de la población, se relaciona la lluvia con la ocurrencia de eventos extraordinarios, la posibilidad de amenazas por inundación y su magnitud.

Las altas acumulaciones diarias de lluvia suelen tener la peculiaridad de estar asociadas a fenómenos tormentosos de gran intensidad, que pueden llegar a precipitar toda el agua en una o dos horas. Esto provoca una situación de aumento repentino de escorrentía superficial y su consiguiente concentración en cauces, lo que puede desencadenar una avenida torrencial o movimientos en masa.

A partir del estudio estadístico de las máximas lluvias diarias, podremos calcular cada cuánto tiempo podría repetirse una lluvia de magnitud determinada con el fin de estimar la peligrosidad de desbordamientos e inundaciones que puedan afectar a áreas habitadas.

Se han extraído los datos de las máximas precipitaciones diarias ocurridas en cada uno de los años de las series estudiadas, para después utilizarlos en un cálculo estadístico de probabilidad de ocurrencia.

En la *figura 4.4* se observa un comportamiento cíclico de las precipitaciones máximas en el tiempo, al igual que se observaba en los datos anuales. Los ciclos suelen ser de cuatro a cinco años con dos o tres años relativamente secos seguidos de un pico de precipitaciones anual.

Si se comparan los picos de máximas lluvias anuales acumuladas y máximas diarias *(figura 4.5 y 4.6*) no se corresponden en su totalidad. Un año significativo es el 1974 por la presencia del huracán Fifí. Se observa como el gráfico de precipitaciones máximas diarias alcanza un máximo en ese año llegando a los 300 mm, mientras que en el de las precipitaciones anuales acumuladas el máximo se encuentra en 1973, con tendencia descendente el año

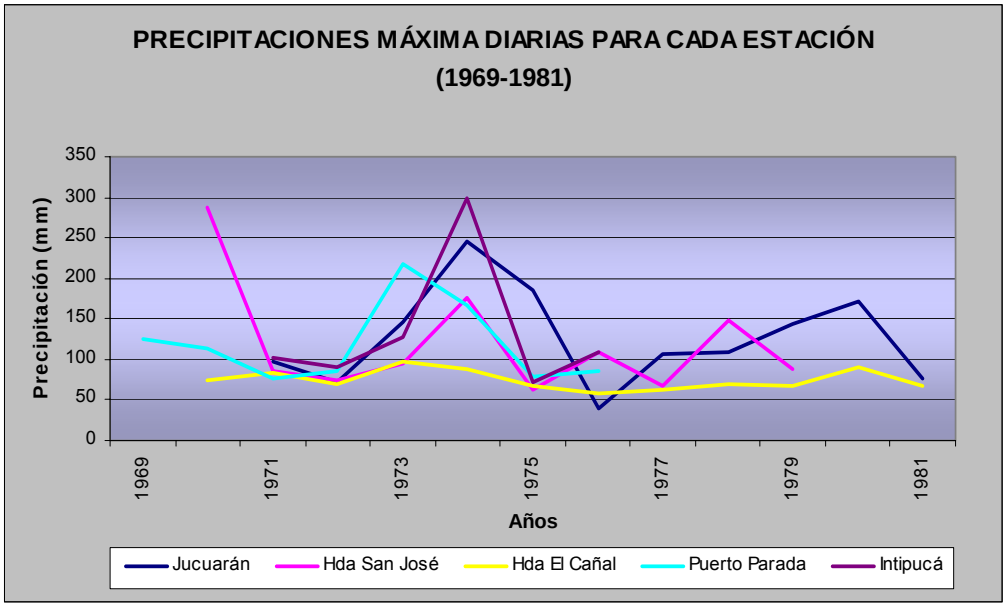


Figura 5.4. – Precipitaciones máximas diarias para cada estación entre 1969 y 1981.

siguiente. De igual forma, en 1970 la precipitación máxima diaria se aproximó a 300 mm, mientras que las acumuladas tendían a bajar. Con este análisis se pretende encontrar patrones de precipitación, y con ello poder predecir un año en el que se puedan dar valores de máxima precipitación diaria.

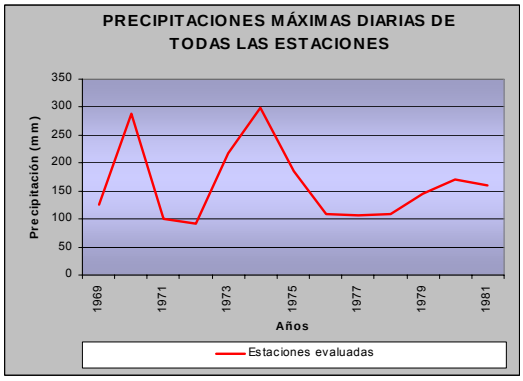


Figura 5.5. – Precipitaciones máximas diarias de todas las estaciones entre 1969 y 1981.

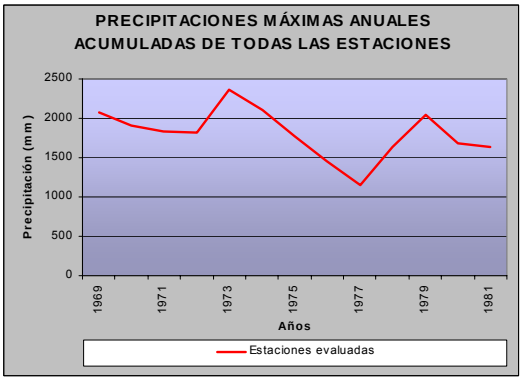


Figura 5.6. – Precipitaciones máximas anuales acumuladas de todas las estaciones entre 1969 y 1981.

Como conclusión, y con la serie reducida de datos disponible, podemos decir que el año siguiente a un máximo en los valores anuales acumulados, coincide con un máximo en las precipitaciones diarias.

Por otro lado, el desfase entre los picos de las dos gráficas puede ser debido a los fenómenos meteorológicos que dan origen a las lluvias máximas diarias, que suelen ser fenómenos de alta intensidad y de corta duración, por lo que no suponen un gran incremento en el total anual.

En este sentido, en la *figura 4.7* se ve como la curva de precipitación acumulada, correspondiente a septiembre de 1974 (mes más lluvioso) en la estación de Jucuarán, no sigue una progresión constante, sino que sufre dos aumentos bruscos correspondientes a tormentas donde se descarga casi la totalidad del acumulado mensual. Estos fenómenos no son los que siempre aportan la mayoría del volumen de lluvias anual, sin embargo son los que a efectos de amenaza por inundaciones más interesa conocer y predecir.

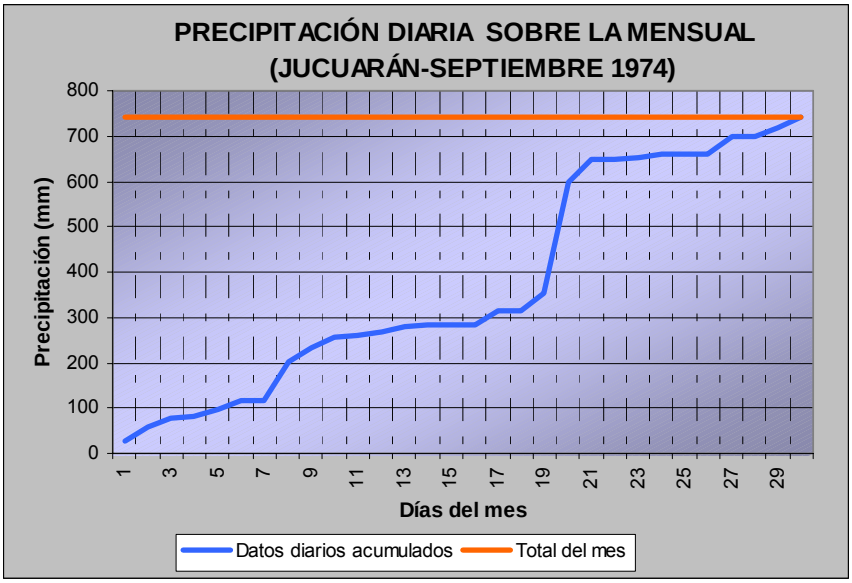


Figura 4.7. – Evolución de la precipitación en un mes en concreto.

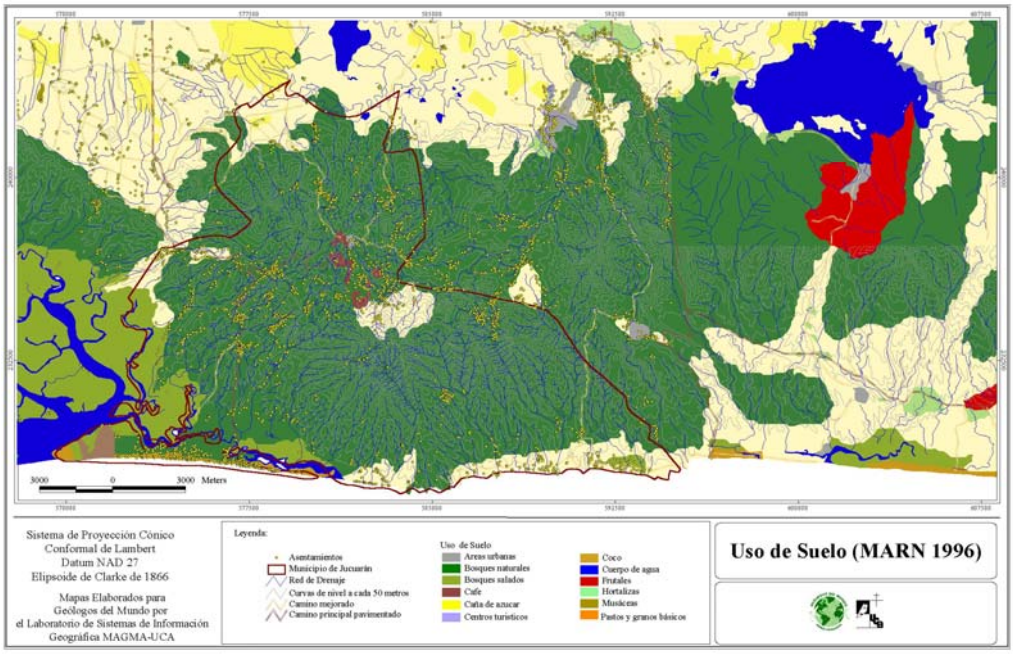
4.2. Vegetación y usos del suelo

La vegetación es un factor fundamental dentro de la conservación de los suelos. Directamente ejerce un efecto de sujeción del mismo por medio de las raíces, siendo un factor condicionante principal en los procesos de inestabilidad gravitatoria. También evita que la lluvia incida directamente sobre el suelo y ponga en suspensión los elementos del mismo transportándolos, es decir, evita la acción erosiva del agua. Otro aspecto importante a considerar de la vegetación es que aumenta la capacidad de infiltración del agua hacia zonas profundas del suelo, aumentando los aportes de agua a los acuíferos subterráneos y por tanto, disminuyendo la escorrentía superficial y la velocidad con la que se desplaza el

agua por la superficie. Esto es así porque disminuye la escorrentía superficial y la velocidad con la que el agua se desplaza por la superficie.

Por estos motivos es importante conocer la vegetación existente en un área, desde el punto de vista de las especies y de la forma de ocupar la superficie. En el *Anexo 5; El Convento* se muestran las especies arbóreas más notables existentes en una porción de Jucuarán (cuenca del Río El Convento), donde además se detalla sus recomendados. De igual forma aparecen las clases de suelo correspondientes a esa área. *(Rubio, Julio (2000): "Estudio Geológico para la Mitigación de Riesgos en la Cuenca del Río El Convento")*

Para el resto del municipio se cuenta con el mapa de uso del suelo realizado por el MARM en 1996, donde se reflejan los porcentajes de los diferentes tipos de vegetación. Es de importancia mencionar que este mapa no refleja la situación actual, y que sería necesaria la actualización de esa información para poder seguir trabajando, entre otras cosas, en la gestión del riesgo. *(ver mapa "Uso del Suelo MARN 1996")*



Suelos

El suelo es la capa superficial meteorizada que cubre la superficie del globo terrestre, en la que es posible el crecimiento de las plantas. El suelo actúa como un sostén físico, pues en él están ancladas las raíces, y fisiológico porque alberga nutrientes y agua. Posee componentes inorgánicos, como son la fracción mineral, el agua y el aire, y componentes orgánicos como son la materia orgánica, los organismos y las raíces.

Los suelos característicos de las montañas litorales (Geografía de El Salvador, 1986) son los latosoles arcillosos rojos. En la Cordillera de Jucuarán son más profundos debido a

los estratos de lavas y tobas de composición basáltico-andesítica de los que se derivan. En ésta cordillera, a diferencia de la Cordillera del Bálsamo, no se han desarrollado suelos de tipo andosol o regosol caracterizados por formarse sobre materiales piroclásticos procedentes de erupciones volcánicas recientes.

Como se mencionó anteriormente, en Jucuarán se dispone de una clasificación de los suelos con su localización típica, origen y potencialidades agrícolas para la cuenca del Río El Convento. Para el resto del municipio no se han realizado estudios de este tipo, siendo de gran importancia para una correcta gestión del territorio.

Clasificación de los suelos según su capacidad de uso

Los usos del suelo representan el tipo de utilización ó actividad actual que se está dando al suelo. Sirve como información básica y de partida para evaluar necesidades de corrección o establecer proyecciones hacia otras áreas.

Los suelos que predominan se agrupan en las clases I, II, III, IV, VI, VII y VIII. Según las aptitudes de los suelos para el cultivo, las tierras de esta zona se clasifican en dos tipos generales: adecuadas para cultivos intensivos, bosques, praderas y otros (clases II, III y IV); y tierras de uso limitado y, generalmente, no adecuadas para cultivos intensivos (clases VI, VII y VIII). A medida que aumenta el número que identifica a cada clase de tierra, disminuye su vocación de uso agrícola y aumenta su vulnerabilidad al no ser utilizada bajo una permanente cubierta forestal

La fracción mineral del suelo se compone de material grueso (cascajos), de las partículas finas (arena, limo y arcilla), y de los compuestos inorgánicos e iones libres ya sean nutrientes o no. La textura, junto con otras propiedades y características tales como el tipo y grado de estructura y el contenido de materia orgánica, definen la distribución de poros en el perfil del suelo y, en gran medida, la capacidad de almacenamiento y su disponibilidad para las plantas. Así todas estas características nos definen la capacidad de uso del suelo.

Los parámetros seguidos en la determinación del mapa “Clases de Tierras de El Salvador” conocido también como mapa agrológico del MARN, son los sugeridos por el USDA (United States Departament of Agriculture) la cual se basa en el porcentaje de pendiente, profundidad efectiva, drenaje, textura y susceptibilidad erosiva. Este mapa es una identificación de las clases de tierras con uso agrícola y no agrícola existente en el país, y son desde la Clase I hasta la VIII.

Las clases de suelo representan las siguientes características:

CLASE I: Son tierras que tienen muy pocas limitaciones que restrinjan su uso. Son adecuados para un margen amplio de plantas y pueden ser usados con toda seguridad para toda clase de cultivos agronómicos.

CLASE II: Tierra apta para una amplia gama de cultivos adaptados a la zona. Pueden presentarse restricciones de leves a moderadas en la agricultura debidas a problemas de erosión, suelo ó drenaje, requieren prácticas cuidadosas de manejo y moderadas prácticas de conservación. De este modo serán aptas para la labranza intensiva y la mecanización.

Tipo de Pendiente: Entre 3-4%, Ondulado Suave.
Erosión: Ligera remoción del 25% del Horizonte A.
Drenaje: Moderado (muy mojado con charcos dispersos después de lluvias)
Textura: Moderados FCA-FC-FAL debajo de 60 cm
Profundidad: 150-91 cm
Pedregosidad: Muy Ligero, menos del 1% Rocas, 5% Piedras.

CLASE III: Tierras que tienen algunas limitaciones moderadas, debidas a problemas solos o combinados, de erosión, suelo o drenaje, para los cultivos intensivos, y requieran prácticas y obras especiales de conservación, algo difíciles y costosas de aplicar. Puede ser utilizada con otros cultivos tales como frutales, pastos o forestales siempre que se adapten a las condiciones ambientales y edáficas. Son aptas para la mecanización.

Tipo de Pendiente: Entre 5-12%, Ondulado.
Erosión: Moderada remoción del 75% del Horizonte A.
Drenaje: Imperfecto (encharcado por periodos de 3 meses al año)
Textura: Moderadamente gruesas FA-AF, más finos CL-CA-C debajo de 60 cm
Profundidad: De 90-51 cm
Pedregosidad: Ligero, de 1-10% de piedras.

CLASE IV: Suelos que debido a problemas solos o combinados de erosión y suelo, en condiciones naturales solamente son aptas para su uso con cultivos intensivos siempre que se utilicen prácticas intensivas de conservación de suelos. Puede ser utilizada económicamente con cultivos permanentes (frutales, café, cacao ó pastos)

Tipo de Pendiente: Entre 13-25%, Alomado.
Erosión: Moderada a fuerte remoción del Horizonte A.
Drenaje: Pobre (empantanado 4 meses al año)
Textura: Gruesos A-AFL, muy finos C siempre que estén a 20 cm de la superficie.
Profundidad: De 50-21 cm
Pedregosidad: Moderada 10-30% Rocas, 0-30% Piedras.

CLASE V: Son tierras con restricciones muy severas para los cultivos intensivos, las limitaciones son tales que el costo de corrección es muy alto o casi imposible de aplicar.

CLASE VI: Tierras que debido a problemas solos o combinados de erosión y suelo, solamente son aptas para el uso con cultivos permanentes (Frutales, café, cacao, pastos) o

especies forestales que se adapten a la zona. Se requieren usar cuidadosas medidas de conservación y manejo.

Tipo de Pendiente: Entre 26-58%, Quebrado.
Erosión: Fuertes efectos en el Horizonte B, presencia de Cárcavas.
Drenaje: Empantanado (8meses al año)
Textura: Gruesas AG-A-AF desde la superficie
Profundidad: De 50-30 cm en pendiente.
Pedregosidad: Severa 30-50% Rocas, 40-60% Piedras

CLASE VII: Tierras que debido a problemas muy severos solos o combinados de erosión y suelo, solamente son aptas para bosques, para la producción de madera u otros productos forestales. Estas tierras tienen limitaciones permanentes que en general son pendientes muy abruptas y suelos muy superficiales.

Tipo de Pendiente: Entre 50-100%, Accidentado
Erosión: Severa remoción del 25% del Horizonte B
Drenaje: Empantanado (con agua libre en superficie casi continuo)
Textura: Muy gruesas A-G desde la superficie.
Profundidad: 16-30 cm en pendiente.
Pedregosidad: Muy severo 50-70% Rocas, 60-80% Piedras

CLASE VIII: Debido a muy severos problemas de erosión o combinados, no presentan ninguna posibilidad de uso agropecuario o forestal productivo; pero puede utilizarse para el desarrollo de vegetación silvestre, protección, recreación o turismo.

Tipo de Pendiente: Mayor del 100%, Muy Accidentado
Erosión: Extrema. Cárcavas y afectado el 75% del área
Drenaje: No aplica
Textura: Muy gruesa AG-G finos C pesados
Profundidad: 0-15 cm
Pedregosidad: Extrema, mayor del 75% Rocas, mayor del 80% Piedras

F = Suelos Francos (se refiere a la proporción de arcilla, limo y arena)
A= Suelos Arenosos
L= Suelos Limosos
C= Suelos Arcillosos
G= Grueso

Los parámetros utilizados representan lo siguiente:

***Pendiente**: Grado de inclinación del terreno en relación a un plano horizontal, se expresa en grados el ángulo formado por el terreno y el plano horizontal.. En porcentaje representa la distancia vertical entre dos puntos separados por una distancia horizontal de 100 m. Significado agrícola: incide sobre las posibilidades de uso y manejo de la tierra en

sistemas de producción. Se debe de manera general dar preferencia a la siembra de rubros perennes en pendientes más inclinadas, y a los rubros de ciclo corto dedicarles terrenos de menor pendiente.

***Erosión**: desprendimiento y arrastre de partículas de suelo por el agua (erosión hídrica) ó por el viento (erosión eólica). Significado agrícola: la erosión acelerada y antrópica es una consecuencia del uso y manejo inadecuado de la tierra; el suelo que permanece es más pobre para la producción y requiere mayor inversión en recuperación.

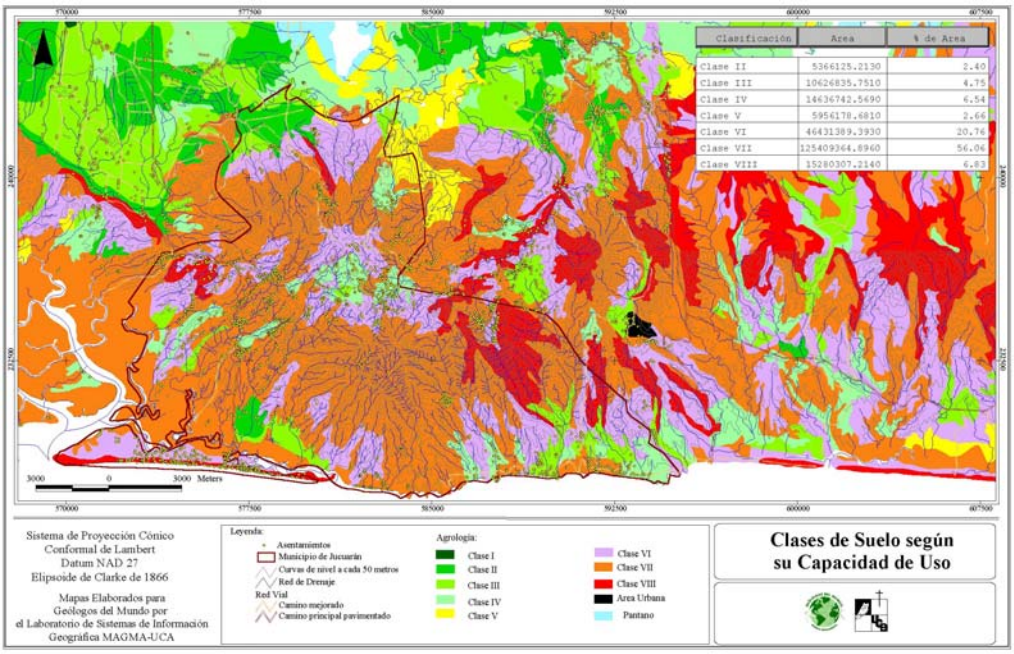
***Pedregosidad**: presencia de piedras sobre la superficie del terreno y semi-enterradas; se puede expresar en % de la superficie del terreno cubierta por piedras. Significado agrícola: a mayor pedregosidad más difícil la labor agrícola, se reduce el área disponible para la siembra, sirve de escondite a plagas y si la pedregosidad está semi-enterrada se reduce la porosidad del suelo favoreciéndose la escorrentía.

***Profundidad del suelo**: límite inferior del perfil del suelo que posibilita el crecimiento radicular de las plantas y a partir de él las plantas tienen su crecimiento restringido. Significado agrícola: Hay suelos con perfiles profundos (>120 cm), que no presentan limitaciones para el desarrollo del sistema radicular de la mayoría de los cultivos. Sin embargo, gran parte de los suelos salvadoreños presentan perfiles de menor espesor, lo cual exige hacer una selección más cuidadosa del cultivo para lograr una mejor adaptación. Los suelos con perfiles delgados son más susceptibles a la erosión, almacenan menos agua y presentan menor disponibilidad total de nutrientes, es decir, están más limitados para suplir las necesidades de los cultivos. Un factor importante a ser tomado en cuenta en el reconocimiento de la profundidad del suelo es el tipo de impedimento que la determina. Si se trata de un material rocoso disperso, fragmentado o poroso, que permite la penetración del agua y raíces de árboles, es menos limitante que la presencia de un material rocoso compacto del tipo “talpetate”

***Textura**: relación cuantitativa entre fracciones de arena, limo y arcilla. Significado agrícola: los suelos de *textura fina* (arcillosos) tienen mayor capacidad de intercambio catiónico y tienden a almacenar más agua que los suelos de *textura gruesa* (arena y limo). Suelos con mayor presencia de limo son más susceptibles a la desagregación de la estructura superficial y formación de costras superficiales que reducen la infiltración del agua en el perfil y aumenta la escorrentía superficial. Por otro lado los suelos arenosos son fáciles de trabajar, pero excesivamente drenados, almacenan poco agua y ponen en riesgo los cultivos en los veranillos. Los de textura fina (arcillosos) suelen ser más pesados, adherentes, susceptibles a la compactación y resbaladizos para la labor agrícola. La textura arcillosa combinada con una estructura compactada y periodo lluvioso, puede ofrecer condiciones de mal drenaje interno y pobres condiciones para el desarrollo del sistema radicular. Los suelos de *textura media*, alrededor de franca o franca arcillosa, son los preferidos por los cultivos productores. Son más fácilmente manejables y presentan condiciones de riesgo normalmente más reducidas que los dos extremos.

***Drenaje**: velocidad con que el agua se desplaza por la superficie del terreno (drenaje externo) y dentro del perfil del suelo (drenaje interno). Un suelo está mal drenado cuando el desplazamiento del agua es lento o muy lento. Significado Agrícola: los suelos mal drenados limitan el crecimiento de las plantas que son susceptibles a la falta de oxígeno y favorece la denitrificación donde los organismos convierten el nitrógeno que las plantas pueden absorber en otras formas volátiles y no absorbibles por las raíces. Un mal drenaje impide ciertas labores agrícolas principalmente si el suelo es arcilloso y la capa freática está cerca de la superficie. Además reduce la disponibilidad de nutrientes en el suelo, limita el crecimiento y funcionamiento de las raíces de los cultivos no adaptados y facilita o potencia la ocurrencia de diferentes tipos de enfermedades. Este último caso es muy importante en el caso de hortalizas y frutales.

En el municipio de Jucuarán, las tierras corresponden principalmente a las clases VI y VII, indicándonos claramente que el uso está enfocado a cultivos permanentes y al bosque, requiriendo medidas de conservación de suelos. *(ver mapa "Clases de Suelo según su Capacidad de Uso")*



El uso actual no se corresponde con las características que son propicias para el manejo adecuado del medio, donde se está explotando de manera amplia cultivos temporales, acentuándose este daño al no realizar medidas de conservación de suelos y al practicar la quema periódicamente. Es por tanto de gran importancia readecuar los hábitos agrológicos, y así contribuir directamente en la ordenada gestión del territorio, y por tanto en la gestión del riesgo. En este sentido existe el *Plan de Manejo de la Bahía de Jiquilisco (ver Anexo 5)*, donde se orientan y priorizan las acciones a desarrollarse en estas áreas.

5. HIDROGRAFÍA SUPERFICIAL

Las redes de drenaje son la manifestación de la escorrentía superficial concentrada y jerarquizada en cauces. Arroyada concentrada y jerarquización implican un proceso dinámico ya que requieren del movimiento de las aguas y su concentración progresiva hacia colectores cuyas dimensiones son proporcionales al volumen de escorrentía generado.

Este proceso dinámico depende de la forma como interactúan numerosos factores:

- La alimentación hídrica: Ya sea a partir de manantiales, o a partir de precipitaciones en forma de lluvia, que incide con intensidades altamente variables.
- La respuesta del suelo ante estas precipitaciones: Sus características edáficas intervienen en el volumen escurrido en función de la textura, estructura, permeabilidad y condiciones de humedad del suelo.
- Las características fisiográficas: pendiente, longitud, posición, orientación y forma de la ladera; que intervienen en la velocidad y aceleración de la escorrentía.
- La cubierta vegetal: que en su clase (herbácea, arbustiva y arbórea) y densidad puede facilitar la infiltración y reducir la energía del impacto de las gotas de lluvia, así como contribuir a la concentración de la arrollada hacia las áreas de menor densidad de vegetación.
- La litología y la teutónica: posibilitando o dificultando la infiltración y el excavado, y condicionando el trazado y configuración que la red adquiere.
- Los factores antrópicos: influyendo directamente en la cubierta vegetal y usos del suelo, así como en obras que modifiquen las condiciones de los cauces.

La influencia de todos estos factores configuran el diseño de la red fluvial a lo largo del tiempo, que evoluciona en forma y número de cauces; una red fluvial cuyos elementos constituyentes pueden cuantificarse y clasificarse.

En el municipio de Jucuarán la red de drenaje presenta forma radial desarrollada sobre conos volcánicos, muy condicionada por la tectónica y creando una serie de subcuencas con la misma disposición. Desde el punto de vista climatológico, la zona se caracteriza por tener dos estaciones muy marcadas, una lluviosa y otra seca, concentrándose las precipitaciones casi exclusivamente en la lluviosa y con una pequeña diferenciación en cantidad e intensidad según nos encontremos en la zona central-septentrional (mas elevada) o meridional. Esta zona más elevada, que corona el Cerro El Monito con 883m, crea unas elevadas pendientes hasta las desembocaduras, sobre todo en la parte de las cabeceras. En la mayor parte de la superficie del municipio, la litología se

presenta en forma de coladas de lava de basalto-andesita y tobas líticas en diferentes grados de meteorización, generando suelos arcillosos. En estos se practican mayoritariamente cultivos temporales, con una superficie de suelo boscoso reducida y en continua disminución.

De las subcuencas existentes se han tomado seis de ellas representativas de toda la zona para su estudio detallado, teniendo en cuenta que el comportamiento del resto puede ser similar, y así poder extrapolar los resultados finales a todo el municipio. Estas se encuentran repartidas en todo el área de estudio de la siguiente forma: Qda. El Jutal y Qda. El Colorado en el norte, Qda. El Emboque en el sureste, Qda. Salamar en el sur y Río El Convento y Río La Ringlera en el suroeste.

A continuación se exponen los métodos de análisis más usuales para el estudio del diseño de las redes fluviales, divididos en caracteres cualitativos y cuantitativos, es decir, la morfología y la morfometría; lo que permite posteriormente definir las características genéticas y evolutivas de las cuencas objeto de estudio.

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de interpretar los valores obtenidos para los distintos índices es que los cauces no son permanentes, y si lo son, los caudales son prácticamente despreciables. Se trata por tanto de torrentes o quebradas por los que sólo circula agua después de eventos tormentosos o durante la época de lluvias, de manera intermitente.

5.1. Delimitación de las subcuencas

El municipio de Jucuarán se limita al norte por el Río Grande de San Miguel y al sur por el Océano Pacifico. Junto a estos márgenes naturales se toman otros dos límites administrativos, al este y oeste, dando en plano una forma aproximadamente triangular al municipio.

Las máximas elevaciones (entre 600 y 900m) se reparten por la zona central y oriental coincidiendo con la parte mas estrecha del municipio, para luego disminuir hasta cotas de 30m en el Río Grande de San Miguel, hasta nivel del mar en las desembocaduras al Océano Pacifico o hasta 10m en la confluencia con los canales y esteros repartidos por el suroeste. Esta configuración del relieve hace que podamos diferenciar dos vertientes principales, una hacia el norte y otra hacia el sur, en las que se han desarrollado una serie de redes de drenaje que caracterizaremos a continuación.

De las principales que desembocan al Río Grande de San Miguel encontramos la Qda. El Zugano, Qda. El Barillal, Qda. El Cacao, Qda. El Jutal, Qda. El Colorado, Qda. Potrero Grande y Qda. El Jicarito (afluente del Río Chilanguera). Continuando en sentido de las agujas del reloj y desembocando al Océano Pacifico tenemos la Qda. El Chaparral, Qda.

El Jiote, Qda. El Emboque, Qda. El Higueron, Qda. La Periquera, Qda. Agua Fria y Qda. Salamar. Para terminar, de las que vierten sus aguas a los canales y esteros de la Bocana La Chepona encontramos la Qda. El Naranjo, Qda. La Bocanita, Qda. El Chorro, Qda. Seca, Río La Ringlera y Río El Convento.

5.2. Morfología.
Caracteres cualitativos de la red de drenaje

Los caracteres cualitativos de la red de drenaje vienen a definir la morfología de la cuenca o de algunos aspectos de esta. A continuación se van a definir para las seis quebradas en estudio las siguientes características: Tipología de las redes de drenaje, características del cauce principal (sinuosidad, topología del lecho y los márgenes) y el perfil longitudinal.

Tipología de la red de drenaje

Según la clasificación de *Howard (1967),* se originan diversos tipos de redes ante sistemas morfodinámicos diferentes, bien con origen en causas climáticas, bien en causas litológicas y estructurales, o bien en ambas combinadas.

Para la zona de estudio que comprende el municipio de Jucuarán, la tipología de la red de drenaje es de tipo radial, de origen topográfico y condicionada por la fuerte tectónica existente.

Fotografía 5.1. Vista de la Qda. El

Si caracterizamos individualmente cada cuenca seleccionada, encontramos que la Qda. El Emboque y los ríos La Ringlera y El Convento, presentan una red subdendrítica – subparalela. Estas tipologías muestran dependencias estructurales que condicionan su trazado, con cambios bruscos de dirección y con valles alargados y rectilíneos, además de uniones anguladas de los tributarios. También presentan este aspecto las redes que se desarrollan sobre litología preferentemente de resistencia uniforme.

La tendencia de las quebradas El Jutal y El Colorado es de una red subparalela, común en áreas de fuertes pendientes, generando también valles rectilíneos y alargados, donde los cauces, escasos en las dos quebradas, siguen un trazado paralelo entre si. Este trazado paralelo en los tributarios se resuelve en uniones anguladas por la dependencia estructural. De igual forma, factores estructurales hacen que en la cabecera se modifique este trazado asemejándose a la red dendrítica. También con aspecto general de red subparalela encontramos la Qda. Salamar, pero esta con una cabecera diferente a las anteriores. Presenta alta densidad de cauces perpendiculares al colector principal y paralelos entre si, recordando a la red pinnada, sin que las características de esta última se le puedan atribuir a esta quebrada. Los motivos para dicha configuración son principalmente estructurales, muy condicionados por la tectónica de la zona.

Cauce principal

Determinado el cauce principal de una red de drenaje como aquel cuya cabecera alcanza la cota mas elevada, su sinuosidad, tipología del lecho y de los márgenes, pueden revelarnos caracteres tanto históricos como presentes de la fuerza de acción lineal a lo largo de su recorrido.

Sinuosidad

El calculo de la sinuosidad propuesto por *Shumm (1963)* se obtiene relacionando la longitud del cauce principal con la longitud máxima del valle que lo forma.

Cuenca	***Qda. El Jutal***	***Qda. El Colorado***	***Qda. Salamar***
Índice de sinuosidad	1.02	1.05	1.03

Cuenca	***Qda. El Emboque***	***Río La Ringlera***	***Río El Convento***
Índice de sinuosidad	1.11	1.09	1.07

Tabla 5.1.- Sinuosidad del cauce principal.

El índice obtenido para la sinuosidad *(tabla 5.1)* es útil sólo para la clasificación; por ello, y dado que define una cualidad tipológica de la cuenca centrada en su cauce principal, se incluye entre las variables cualitativas.

Normalmente, en áreas de montaña, la longitud media del valle y la longitud del cauce principal coinciden, lo que nos lleva a obtener un índice de sinuosidad hidráulica escasamente superior a 1 en todas las quebradas y ríos analizados, dado que las mayores pendientes dan lugar a bajas sinuosidades. De los diversos cauces fluviales propuestos por SCHUMM (1963) nos encontramos que pertenecen a los que él denomina canales rectilíneos, con transporte de carga de fondo o de todo tipo, con baja actividad de

ensanchamiento del cauce y alta actividad de la incisión. A estos canales se les asocian redes paralelas o subparalelas, tipologías de redes obtenidas en los casos que nos ocupan.

Tipología del lecho y los márgenes

Atendiendo a las diversas tipologías de lechos encontrados, las características del canal varían entre predominio de grandes cantos y bloques, cuyo tamaño y peso revelan una mayor dificultad para ser movidos, y zonas con predominio de material fino. Entre ambos tipos existe una gran variedad de tamaño de partículas, además de la posibilidad de presentarse el lecho en roca viva.

El área de la cuenca experimenta procesos erosivos más intensos cuanto mayor son los tamaños de las partículas de su lecho, aunque estas se muevan con mayor dificultad e intervalos de tiempo más largos.

Fotografía 5.2. – Depósito de bloques y arena en la Qda. El Emboque.

Lo primero a tener en cuenta es que las quebradas se desarrollan sobre un sustrato altamente fracturado y meteorizado, por lo que el tipo de material que encontramos en el lecho esta condicionado por estas características, dando bloques y cantos de diversos tamaños en todas las partes del recorrido *(fotografía 5.2).*

Fotografía 5.3. – Bloques depositados en la avenida del huracán Mitch. Qda. Salamar.

Otro factor que ha modificado y condicionado la tipología del lecho es la avenida del huracán Mitch, dejando a su paso unas características muy diferentes a las anteriores: ensanchamiento y encajamiento de los cauces, soterramiento de canales, creación de nuevas quebradas y desvío de las existentes, aumento considerable del tamaño medio de las partículas, etc.

Después de analizar todos los puntos visitados y contabilizar los siguientes elementos: material arenoso, material decimétrico, material métrico, lecho de roca madre, acumulaciones de bloques, tipos de depósitos en los taludes, zonas de remanso con material fino y cauces vegetados; pasamos

a indicar la evolución de estos elementos según nos encontremos en la parte alta, media o baja de las subcuencas. Para la diferenciación de estas zonas se ha tenido en cuenta de forma general la pendiente del canal, la morfología y la elevación, sin que haya unos rangos comunes para todas las quebradas.

En la parte alta de las quebradas se observan abundantes puntos donde aflora roca madre en la sección del cauce *(fotografía 5.4),* disminuyendo en un 50% en la parte media y no encontrando ningún punto en la parte baja. Es un indicador de la acción del río, puesto que arranca y transporta material en lugar de depositarlo. También aflora en los márgenes, principalmente en las partes convexas de la curva del cauce, encontrando en estos taludes mayoritariamente depósitos aluviales, y en menor proporción coluviales y roca masiva. La acción erosiva del flujo socava los materiales más susceptibles a la erosión produciendo desprendimiento por descalce de los materiales más resistentes, pasando todos a formar parte del lecho.

Fotografía 5.4. – Afloramiento de toba en el lecho de la Qda. Salamar

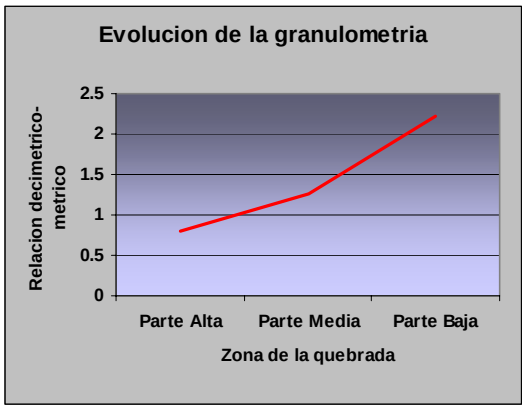


Figura 5.1. – Relación de tamaños en las diferentes

Respecto a la granulometría encontrada, vemos como la relación de tamaños decimétrico/métrico aumenta según pasamos de la parte alta, a la media y baja *(figura 5.1).* De la misma forma, la fracción arena aparece de forma predominante en las partes media y baja, así como las zonas de remanso con material arcilloso. Con esto determinamos las áreas donde la erosión lineal incide de manera más acusada (parte alta), arrancando material de las laderas y transportándolo aguas abajo hasta unas distancias dependientes de la energía que alcance la corriente (parte media y baja).

Fotografía 5.5. – Potencia de una barra en la Qda. El Chorro.

En este sentido, los depósitos en barra generados a lo largo de las quebradas son más abundantes en la parte media y baja, con dimensiones que varían desde 40m de largo, 35m de ancho y 3m de alto hasta otros de 5m de largo, 2m de ancho y 1,5m de alto *(fotografía 5.5).* Éstos están compuestos en la parte alta de bloques métricos, pasando a una granulometría con más

proporción de cantos decimétricos en zonas menos elevadas.

Se observa como las zonas más vegetadas dentro del cauce corresponden a depósitos dejados por el Mitch, apareciendo en su mayoría arbusto e incluso árboles de hasta 5m. Mientras, los canales utilizados por la escorrentia en años posteriores se encuentran en su mayoría con el lecho sin vegetación debido a la propia erosión de las aguas *(fotografía 5.6).*

Fotografía 5.6. – Desembocadura de la Qda. El Emboque.

En este aspecto, podemos observar como los canales de menor envergadura son colonizados más fácilmente por la vegetación, indicando una menor fuerza de la corriente pero creando obstáculos naturales en su trayectoria.

Valoración de los caracteres cualitativos de las subcuencas

Los índices cualitativos obtenidos dan una aproximación válida a la dinámica de la cuenca fluvial según la clasificación de *Senciales (1995).* Los resultados aparecen en la *tabla 5.2.*

Carácter a analizar	Tipología de las subcuencas	Valor
Tipología de la red	Subparalela-subdendritica	2
Sinuosidad del cauce	Rectilíneo	3
Tipo de lecho	Guijarros, rocas y cantos rodados sin caudal	4
Tipo de márgenes	Roca aflorante y de acumulación	2
Valoración		**11**

Tabla 5.2. – Características del cauce, tipo de lecho y márgenes.

El resultado final indica una potencial fuerza erosiva elevada de sus cauces, con acción de ablación y transporte. Estos resultados de alta actividad fluvial se obtienen en cuencas de áreas montañosas por una mayor agresividad del clima.

Perfil longitudinal de las quebradas y ríos

El perfil longitudinal del río es la línea que dibuja un río desde su nacimiento hasta su desembocadura. Su utilidad principal viene dada por su incidencia directa en la velocidad

que puede llevar un caudal a lo largo del cauce, lo que condiciona su energía cinética y, por tanto, su potencial erosivo.

De los seis casos estudiados en detalle, los cauces correspondientes a la Qda. El Colorado y la Qda. Salamar presentan los porcentajes mas altos de pendiente, llegando a 60% en la zona de cabecera o parte alta. El resto ronda el 35%, menos en el Río El Convento que no supera el 11% en estas zonas más elevadas.

Entrando en lo que denominamos parte media hay un cambio susceptible en el perfil de los cauces. Las quebradas que tenían una pendiente del 60% pasan a valores del 30%, mientras que el resto varían entre el 8% y el 11%. Es en esta parte media donde encontramos las mayores anomalías o cambios bruscos en el perfil con la presencia de saltos de hasta 15m como en el Río El Convento, de 40m en la Qda. La Ringlera, de 10m en la Qda. El Colorado u otros más pequeños y abundantes que no sobrepasan los 3m repartidos en todos los cauces visitados *(fotografías 5.8 y 5.9).* También es habitual encontrar zonas con pequeños desniveles de 1m formando escalones consecutivos donde se acumula material fino en pequeñas pozas situadas en la base.

Fotografía 5.9. – Salto de 40m en el Río La Ringlera.

Fotografía 5.8. – Salto de 3m en la Qda. El Colorado.

La litología presente en los saltos es de coladas de lava de basalto-andesita asociada a fallas subverticales o a la alternancia con niveles menos competentes de toba. En cualquier caso se observa gran acumulación de depósitos debido al fuerte cambio de pendiente y al ensanchamiento en algunos puntos de este tramo, así como un alto potencial erosivo en zonas de encajamiento de los cauces en el terreno *(fotografía 5.10).*

Fotografía 5.10. – Cauce encajado en el Río El Convento.

A partir de aquí, entramos en la denominada parte baja, con valores de pendiente cercanos al 2%. Esta pérdida de pendiente ocasiona la disminución del potencial erosivo, y consecuentemente la pérdida del encajamiento de los cauces afectando la capacidad soportable de éstos. Es aquí donde el perfil del cauce se encuentra próximo al equilibrio, la dinámica de las quebradas pasa de erosiva a sedimentaria, depositando gran parte de la carga sólida transportada principalmente en las grandes avenidas *(fotografía 5.11).*

Fotografía 5.11. – Desembocadura de la Qda. El Emboque.

Características físicas principales de las subcuencas

Las características físicas principales de las subcuencas se muestran en el *Anexo 4: Análisis de Inundaciones* para su posterior análisis, descripción e interpretación en el apartado de morfometría.

5.3. Morfometría.
Caracteres cuantitativos de la red de drenaje

El análisis morfométrico de una cuenca es un método de trabajo que permite medir la erosión de los cursos de agua teniendo en cuenta las características geométricas de los elementos de las redes de drenaje.

En este sentido, *Strahler (1964),* define la morfometría fluvial como la medida de las propiedades geométricas de la superficie sólida de un sistema de erosión fluvial. Para el análisis morfométrico, este mismo autor considera la cuenca de drenaje como un sistema geométrico plano, considerando, en principio, las longitudes de los cauces (valor unidimensional) y la superficie de las cuencas (valor bidimensional).

En definitiva, con el análisis morfométrico se pretende cuantificar la evolución del paisaje fluvial, definir el estadio de evolución en que se encuentra y valorar su estado erosivo.

Relación de bifurcación

Se denomina relación de bifurcación a la proporción existente entre el número de segmentos de un orden dado y los de orden inmediato superior. Esta relación tiende a seguir una progresión geométrica que comienza con el único segmento de orden mas elevado y crece según una relación constante de bifurcación *(Horton, 1945).* Esto suele ser más acertado con la uniformidad del clima y la litología de la región a estudiar.

R_b = Relación de Bifurcación

$R_b = U_n / N_{u+1}$

U_n = Número de cauces de orden "u"

N_{u+1} = Número de cauces del orden inmediato superior a "u"

Quebrada *El Jutal*			Quebrada *El Colorado*			Quebrada *El Emboque*		
Orden del	Número de	Rb	Orden del	Número de	Rb	Orden del	Número de	Rb
1	12	12	1	17	3.4	1	120	6
2	1	1	2	5	5	2	20	6.67
3	1		3	1		3	3	3
						4	1	
		6.5			4.2			5.22

Quebrada *Salamar*			Río *La Ringlera*			Río *El Convento*		
Orden del	Número de	Rb	Orden del	Número de	Rb	Orden del	Número de	Rb
1	65	4.33	1	60	5	1	34	3.78
2	15	7.5	2	12	3	2	9	4.5
3	2	2	3	4	4	3	2	2
4	1		4	1		4	1	
		4.61			4			3.43

Tabla 5.3. – Resultados de la relación de bifurcación.

La relación de bifurcación final para cada cuenca se obtiene a partir del valor medio de las relaciones entre segmentos. Valores altos indican áreas de fuertes pendientes con rápida concentración de la escorrentía, pero con picos de crecida poco importantes. En cambio, las áreas con índices más bajos suelen presentar más altos riesgos de inundación por concentración brusca de la escorrentía.

De las cuencas seleccionadas tienen valores entre 3 y 5 la Qda. El Colorado, la Qda. Salamar, el Río La Ringlera y el Río El Convento. Con valores superiores a 5 tenemos la Qda. El Jutal y la Qda. El Emboque. Todos ellos indican áreas de montaña y fuerte dependencia estructural, caracterizada por cuencas estrechas y alargadas en las que un segmento de orden "u", afluye gran numero de segmentos de orden "u-1".

Si analizamos la evolución de los diferentes tramos de las quebradas y ríos, vemos que los valores más altos se encuentran en los dos primeros órdenes, y que según nos alejamos de las cabeceras disminuye en gran medida el valor de la relación de bifurcación. Esto es debido al gran número de afluentes de primer y segundo orden que se desarrollan en las zonas de mayor pendiente, o lo que es lo mismo, en las vertientes mas elevadas, pasando a tramos de orden 3 y 4 más escasos.

Mediante un modelo semilogarítmico en el que se sitúan en el eje de Y (logarítmico) el numero de cauces, y en el eje de X (normal) el numero de orden jerárquico, obtenemos un trazo rectilíneo decreciente *(figura 5.2).* Las desviaciones en el trazo representan las anomalías de drenaje, que pueden ser indicio de distintas fases erosivas según nos encontremos en la parte alta o baja de las quebradas.

Todas las cuencas sujetas a estudio presentan desviaciones de la recta, siendo las más notables las que corresponden a la Qda. Salamar y a la Qda. El Jutal. Estos cambios bruscos entre órdenes diferentes indican alteraciones evidentes en la dinámica hídrica. Si observamos la morfología de estas cuencas podemos ver que la jerarquización de la red de drenaje se desarrolla de forma discontinua, situándose la mayor parte de los cauces de primer y segundo orden en la zona alta o de cabecera.

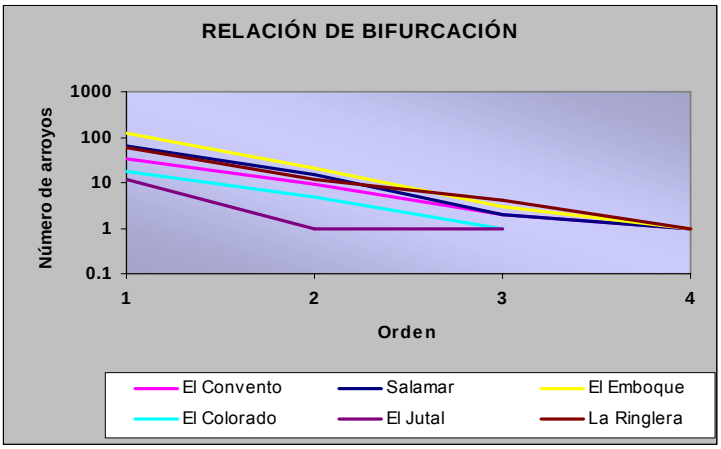


Figura 5.2. – Modelo semilogarítmico de relación de bifurcación.

Estas anomalías deben ser contrastadas mediante otros procedimientos (relación de longitud) para aclarar su causa.

El hecho de que las bajas relaciones de bifurcación, que implican crecidas mas bruscas y de mayor magnitud, se encuentren en las zonas media y baja de las quebradas, y de que las altas relaciones de bifurcación las encontremos en la zona de cabecera, donde el pico de crecida es muy rápido, hace que, sumando estos dos factores, concluyamos en que estas cuencas presentan una relación de bifurcación propicia para las avenidas torrenciales; por la rápida acumulación y la elevada magnitud en que se pueden presentar las crecidas.

Relación de longitud

Se puede definir como la proporción existente entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y la de los segmentos del orden inmediato inferior.

R_l = relación de longitud

$R_l = L_u / L_{u-1}$

L_u = longitud media de los cauces de orden “u” (m)

L_{u-1} = longitud de un cauce de orden “u-1” (m)

Quebrada *El Jutal*			**Quebrada** *El Colorado*			**Quebrada** *El Emboque*		
Orden del	**Longitud**	**Rl**	**Orden del**	**Longitud**	**Rl**	**Orden del**	**Longitud**	**Rl**
3	3875.28	2.41	3	4511.03	3.81	4	2326.99	0.47
2	1609.97	2.77	2	1183.84	2.47	3	4992.55	5.21
1	581.34		1	479.04		2	958.62	2.17
						1	441.08	

Quebrada *Salamar*			**Río** *La Ringlera*			**Río** *El Convento*		
Orden del	**Longitud**	**Rl**	**Orden del**	**Longitud**	**Rl**	**Orden del**	**Longitud**	**Rl**
4	5826.51	19.24	4	8011.07	16.09	4	1953.7	0.6
3	302.86	0.57	3	497.88	0.51	3	3282.08	4.42
2	531.62	1.98	2	974.44	7.32	2	741.72	2.01
1	268.99		1	133.18		1	368.55	

Tabla 5.4. – Resultados de la relación de longitud.

Los valores medios que se obtienen oscilan entre 1,5 en cuencas en las que se incrementa poco la longitud de los cauces y 3, para cuencas en las que los ordenes superiores presentan grandes longitudes. También nos encontramos valores inferiores a 1 debido a que hay una disminución de la longitud de los cauces de orden superior.

En las quebradas y ríos seleccionados vemos valores dispares sin que se guarde un orden jerárquico en la relación de longitud. En la Qda. Salamar y el Río la Ringlera se pasa respectivamente de 19.24 y 16.09 para la relación 4 – 3 a 0.57 y 0.51 para la relación 3 – 2. También vemos como en el Río El Convento y la Qda. El Emboque aparecen valores anómalos, 0.47 y 0.6 en la relación 4 – 3, para pasar a 5.21 y 4.42 en la relación 3 – 2.

Todas estas anomalías son representables en una grafica semilogarítmica en la que en el eje de X se sitúa el orden de los cauces, mientras que en el eje de Y se representa la longitud media acumulada *(figura 5.3).*

Ello genera un trazo rectilíneo de sentido creciente en el que la longitud de los cauces aumenta a la par que el orden jerárquico. La existencia de distintos valores modales en la razón de longitud entre segmentos de diferentes ordenes, o lo que es lo mismo, desviaciones en la recta, pueden interpretarse como indicio de dos etapas erosivas en una misma cuenca. Otro factor que puede influir en estas anomalías es la marcada dependencia estructural de los cauces, donde siguen trayectorias rectilíneas y subparalelas muy largas.

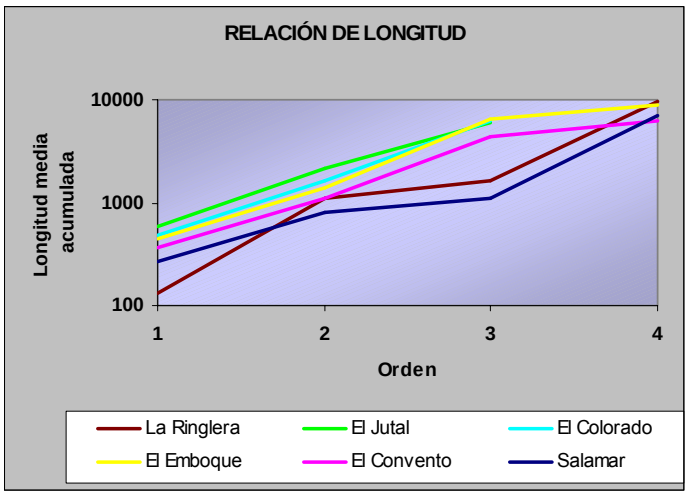


Figura 5.3. – Modelo semilogarítmico de la relación de longitud

Debido a que una baja relación de longitud muestra mayor energía concentrada bruscamente, situación que aparece en la confluencia de afluentes con cauces principales en la Qda. El Emboque, Qda. Salamar, Río La Ringlera y Río El Convento, concluimos que las subcuencas a estudio presentan una relación de longitud propicia para las avenidas torrenciales.

Factor de forma

Sala y Gay (1981) la definen como la razón entre el diámetro de un círculo con la misma área que la de la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma. Cuanto más se acerca la razón al valor 1, más se aproxima la forma de la cuenca al círculo; cuanto mayor sea el valor hallado en esta relación, menos elongada será la cuenca.

R_e = relación de elongación

$R_e = (1'129 \times A^{0'5}) / L$ A = superficie de la cuenca (m^2)

L = longitud máxima de la cuenca (m)

Cuencas	Factor de forma
Qda. El Jutal	0.43
Qda. El Colorado	0.5
Qda. El Emboque	0.69

Cuencas	Factor de forma
Qda. Salamar	0.48
Río La Ringlera	0.45
Río El Convento	0.5

Tabla 5.5. – Resultados del factor de forma.

El valor máximo, para cuencas circulares es de 1'275. Los valores obtenidos para las cuencas en estudio son muy inferiores al valor anterior, lo que nos indica que son unas cuencas de montaña, escarpadas y elongadas. Aún así se puede observar en la parte de cabecera formas circulares, aunque no se represente numéricamente al obtener un factor de forma de toda la subcuenca.

Las cuencas elongadas presentan un claro retardo de la concentración de la escorrentía a causa de la gran longitud del cauce principal, y con ello, mayor brusquedad en la crecida, una vez concentradas las aguas. Parece lógico que una baja razón de elongación genere bruscas crecidas, ante la incorporación más rápida y casi simultanea de los caudales de escorrentía de un aguacero, fluyendo casi a la vez hacia un mismo punto.

Factor de circularidad

Es un parámetro que relaciona el área de la cuenca y el área de un círculo con igual perímetro.

R_c = factor de circularidad

$R_c = (4\pi A) / p^2$

A = área de la cuenca (m^2)

P = perímetro de la cuenca (m)

Cuencas	*Qda. El Jutal*	*Qda. El Colorado*	*Qda. El Emboque*
Factor de circularidad	0.3	0.43	0.47

Cuencas	*Qda. Salamar*	*Río La Ringlera*	*Río El Convento*
Factor de circularidad	0.4	0.35	0.45

Tabla 5.6. – Resultados del factor de circularidad.

Si consideramos que el valor máximo, correspondiente a una cuenca circular es 1, se pude observar que los valores obtenidos, entre 0.30 y 0.47, coinciden con la conclusión obtenida a partir de la relación de elongación, donde se definía a la cuenca como elongada. Las cuencas de áreas más escarpadas suelen mostrar bajos índices de elongación, pues al tener que salvar fuertes desniveles, presentan cauces principales muy alargados.

Para comparar estos resultados con los que presenta la parte de cabecera se hizo el análisis de esta zona en la Qda. Salamar por presentar una morfología más circular. Se obtiene un valor de 0.54, más elevado que el analizado para toda la cuenca (0.40), pero definiéndola aún así como elongada.

Frecuencia de drenaje de los cauces elementales

Es la relación existente entre el número de cauces de primer orden y el área de la cuenca. Se expresa en número de cauces por kilómetro cuadrado y se define como Fd_1.

$Fd_1 = Nv_1 / A$

Nv_1 = número de cauces de primer orden

A = área de la cuenca (Km^2)

Señala la intensidad de los procesos iniciales de arrollada y permite relacionarlo con otros factores del medio.

Cuencas	*Qda. El Jutal*	*Qda. El Colorado*	*Qda. El Emboque*
Frecuencia de drenaje	2.31	2.62	4.29

Cuencas	*Qda. Salamar*	*Río La Ringlera*	*Río El Convento*
Frecuencia de drenaje	10	3.94	3.17

Tabla 5.7. – Resultados de la frecuencia de drenaje.

La alta frecuencia permite la rápida transmisión de la escorrentía a los cauces de primer orden y representa la existencia de una marcada acción de la arrollada concentrada.

Aunque los valores esperados se suponían altos, éstos son bajos excepto el de la Qda. Salamar que llega a 10. La razón tendríamos que buscarla en la cartografía de los

cauces de primer orden, donde la escala de trabajo no permite la precisión necesaria para identificarlos todos.

Densidad de drenaje

Es uno de los parámetros más importantes en el análisis morfométrico, ya que describe el estado erosivo de la cuenca al relacionar forma y procesos de modo claro. Un área con alta densidad de drenaje posee mayor superficie ocupada por canales de drenaje, reservando una superficie de dimensiones variables para conducir con mayor velocidad el caudal generado por las aguas de escorrentía.

.

Strahler (1964), la define como la relación entre el sumatorio de la longitud total de los cauces de todos los órdenes y el área total de la cuenca:

D = densidad de drenaje expresada en Km. de cauce por Km^2

$D = \sum L_k / A_k$ $\sum L_k$ = suma de la longitud total de los cauces de todos los órdenes (Km.)

A_k = área total de la cuenca (Km^2)

Para *Strahler*, los valores menores de 10, en nuestro caso todos, indican una baja densidad de drenaje y una textura gruesa, lo que suele darse en zonas de gran masividad litológica y espesa cobertera vegetal, así como en materiales permeables y con alta infiltración.

Cuencas	***Qda. El Jutal***	***Qda. El Colorado***	***Qda. El Emboque***
Densidad de drenaje	2.4	2.87	3.2

Cuencas	***Qda. Salamar***	***Río La Ringlera***	***Río El Convento***
Densidad de drenaje	4.9	1.95	2.59

Tabla 5.8. – Resultados de la densidad de drenaje.

Según la interpretación de *Morisawa (1985),* los valores menores de 8 caracterizan a un suelo permeable o con roca resistente dentro de un clima lluvioso con vegetación abundante y una textura gruesa de la red.

Como vemos, este factor es interdependiente con las precipitaciones; éstas provocan mayor densidad de drenaje en climas templados-húmedos y tropicales- húmedos en los que se superan los 1500 mm/año. Los climas de estacionalidad pluviométrica más marcada, y con ello mayor intensidad de éstas a lo largo del año, generan también altas densidades de drenaje.

Como en el caso de la frecuencia de drenaje, cabría esperar valores más altos de densidad de drenaje, mientras que el mayor es de 4.90 para la Qda. Salamar. También se achaca esta disyuntiva a la falta de precisión cartográfica, escalas muy grandes, a la hora de dibujar la red de drenaje. Otro factor que altera el resultado es lo anticuado de las fotografías aéreas, encontrándose la zona mucho más vegetada que en la actualidad. También es de importancia mencionar que después del huracán Mitch se crearon nuevos cauces *(fotografía 5.12)* y se ampliaron los ya existentes, modificándose en gran medida la estructura de la red de drenaje que aparece en las cartografías disponibles.

Fotografía 5.12. – Nuevo cauce en la parte baja del río El Convento.

La razón de relieve

Es la relación entre el desnivel de la cuenca y la longitud máxima de la misma. La importancia de la razón de relieve radica en que tiene una relación directa con la pérdida anual de sedimento *(Sala y Gay, 1981)*

Este parámetro se puede calcular según dos autores:

Según *Schumm (1956)*: Se calcula relacionando el desnivel máximo de la cuenca y la longitud máxima de la misma. Con esta expresión se obtiene la pendiente máxima de la cuenca.

R_r = relación de relieve

$R_r = H / L_{máx}$

H = desnivel máximo de la cuenca (m)

$L_{máx}$ = longitud máxima de la cuenca (m)

Según *Melton (1957)*: Relaciona el desnivel absoluto de la cuenca y el perímetro de la misma. Con esta expresión se obtiene la pendiente media o "razón relativa de relieve"

R = relación de relieve

$$R = H / P$$

H = desnivel absoluto de la cuenca (m)

P = perímetro de la cuenca (m)

Cuencas	***Qda. El Jutal***	***Qda. El Colorado***	***Qda. El Emboque***
Razón de relieve *(Schumm, 1956)*	0.12	0.13	0.07
Razón relativa de relieve *(Melton,1957)*	0.05	0.05	0.02

Cuencas	***Qda. Salamar***	***Río La Ringlera***	***Río El Convento***
Razón de relieve *(Schumm, 1956)*	0.15	0.08	0.09
Razón relativa de relieve *(Melton,1957)*	0.06	0.03	0.04

Un incremento de la razón de relieve produce un incremento de la pérdida anual de sedimento: una alta razón de relieve implica la posible mayor velocidad del caudal y con ello mayor capacidad denudativa; pero esta capacidad es potencial, ya que depende de la presencia del caudal y de su volumen, de la intensidad de las precipitaciones que provocan caudales diferentes, y de la resistencia del sustrato a ser erosionado por la acción mecánica.

Fotografía 5.13. – Cabecera Qda. El Chorro.

La razón de relieve hace posible conocer la existencia de áreas locales con gran velocidad de los caudales, mientras que la razón relativa de relieve considera en mayor medida la existencia de fuertes velocidades de caudales generalizadas, debidas a la pendiente de la cuenca *(fotografía 5.13)*

Los valores analizados son bajos, quedando eclipsadas las altas pendientes que nos encontramos en áreas de cabecera

Número de rugosidad de Strahler

Relaciona el desnivel máximo de la cuenca con su densidad de drenaje.

H = desnivel máximo (Km.)

NR = H Dd Dd = densidad de drenaje

Cuencas	*Qda. El Jutal*	*Qda. El Colorado*	*Qda. El Emboque*
Número de rugosidad	2	2	2

Cuencas	*Qda. Salamar*	*Río La Ringlera*	*Río El Convento*
Número de rugosidad	4	1.46	2

Tabla 5.10. – Resultados del número de rugosidad.

Es útil para el análisis evolutivo, dado que al comparar una misma red en años diferentes, un aumento de los desniveles o de la densidad de drenaje conllevará un aumento del número de rugosidad, lo que implica un incremento de la acción erosiva, bien por acentuarse la pendiente o bien por intensificarse la arrollada concentrada.

Pendiente de los cauces

Es útil la comparación de las pendientes medias de la cuenca con la pendiente real del cauce principal. Este presenta mayor longitud, menor desnivel, mayor amplitud,.... todo ello como manifestación de una posible reducción de la energía que aporta la pendiente, pero a su vez, como muestra de concentración de caudales sólidos y líquidos que dan lugar al aumento de la amplitud del cauce para hacerlo capaz de soportar el incremento de tales caudales.

Una alta pendiente de los cauces de primer orden revela la energía inicial de la arrollada concentrada. La mayor pendiente de los cauces de la cuenca supone mayor velocidad y, por tanto, una mayor energía erosiva de los caudales. En este sentido vemos como gran parte de las vertientes de las partes alta y media presentan pendientes superiores al 40%, dando lugar a una importante energía acumulada en los cauces de primer orden. Como ya se ha mencionado, muchos de éstos no son cartografiables a la escala de trabajo, pero en reconocimiento de campo se ha verificado su existencia y la consecuente importancia en la dinámica de las subcuencas del municipio.

6. GEOLOGÍA

La geología (geo-tierra, logia-ciencia), es la ciencia que tiene como estudio la composición, estructura, morfología y edad de la Tierra. En el presente capítulo se pretende dar a conocer la geología y diferentes disciplinas que esta abarca (estratigrafía, tectónica, geomorfología, etc.) características del municipio de Jucuarán. Se describe a continuación el marco regional y local de las diferentes disciplinas.

De la carencia de estudios a detalle de la geología del área surge el estudio litológico del sector Suroeste del municipio. Un estudio litológico consiste en el análisis del tipo de roca que esta presente en una determinada zona geográfica. El estudio litológico del municipio de Jucuarán es importante, ya que al fin y al cabo, todos los procesos que se puedan generar físicamente sobre el terreno, involucraran sin ningún duda alguna el material por el cual el terreno está formado.

Cabe remarcar, que no se pretendió hacer una descripción genética de las rocas, es decir, no se pretendió generar un mapa geológico que explicase la génesis de las lavas y su edad, sino que el propósito principal es el de caracterizar el tipo de litología que aparece, con el fin de ser una ayuda y un soporte importante para los otros estudios del proyecto: el análisis hidrogeológico y el de inestabilidades gravitatorias de ladera, además de constituir un insumo en sí mismo.

Teniendo en consideración la superficie del municipio (240 Km^2), para la parte hidrogeológica, se dividió la zona de estudio en cuencas hidrográficas y se dio prioridad a la zona sur-oeste del municipio por diferentes motivos: por la futura intención de la construcción de una planta de residuos, por la creciente importancia de la zona como destino turístico, por ser una de las mayores cuencas del municipio, por la mayor facilidad de acceso, etc. De esta forma el estudio litológico priorizó esta zona. Sin embargo, la adquisición de datos se amplió a otras zonas para tener una idea más general de la litología y poder tener más información, que ayudase a la interpretación de las unidades. El tiempo de recogida de información estaba limitado en tres meses por una sola persona con bajos recursos materiales, lo cual fue un condicionante importante.

La metodología implementada se realiza a través de un levantamiento de puntos litológicos (ver ficha en el Anexo 2) de una forma georeferenciada, para poder ser introducidos en una base de datos informatizada y ser usada por el sistema de información geográfica (SIG); de esta manera, cualquier aporte que dé lugar a nuevas interpretaciones, puede hacer uso del trabajo ya realizado. En el estudio no sólo se identificaron el tipo de roca que aflora, también se intentó caracterizar los aspectos físicos que presenta. Estos aspectos físicos son el grado de meteorización y/o alteración, y la fracturación, los cuales son factores importantes tanto para el análisis de susceptibilidad a inestabilidades en ladera

como para el estudio hidrogeológico. Dado que cualquier interpretación a partir de un levantamiento de puntos tiene cierto carácter subjetivo, el inventario de puntos litológico constituye un insumo importante para futuras ampliaciones de estudios geológicos, hidrogeológicos, etc.

Para el estudio se contó con la estratigrafía descrita por Baxter en 1984 y la geología descrita en el mapa geológico del año 1978 a escala E-1:100.000 diseñado por la misión alemana. La zona estudiada fue cartografiada por H.R. Bosse y H. S. Weber. Este estudio sirvió de apoyo para realizar una caracterización litológica más a detalle, a escala 1:25.000.

6.1. Marco geológico regional

Resultado de la subducción en dirección NE de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe, se genera una cadena volcánica Centroamericana que se extiende desde Guatemala hasta Costa Rica, con una longitud de 1.100Km, estando El Salvador situado aproximadamente en la parte central. La compresión producida por la subducción genera un intenso fallamiento en todo el país y es también el origen de la acentuada actividad volcánica y sísmica. Por ello, se define la geología general del país por la masiva presencia de rocas volcánicas y su morfología por la alternancia de edificios volcánicos elevados sobre las planicies.

El Salvador es, desde el punto de vista geológico, un país extremadamente joven si se considera que una cuarta parte del territorio nacional es de edad pleistocénica (1,8Ma) y tres cuartas partes están cubiertas por rocas de edad terciaria, predominando las de época pliocénica (5,3Ma).

Los terrenos más antiguos son de edad cretácica y cubren aproximadamente un 5% del territorio salvadoreño. Solamente estos últimos son de origen sedimentario marino, las demás rocas, con pocas excepciones, están originadas por fenómenos volcánicos. En algunos puntos aparecen además rocas intrusivas que pertenecen a la época miocénica (también terciarias).

CRONOLOGÍA	**WIESEMANN et al. (1978)**
Unidades sedimentarias terciarias-cuaternarias	FORMACIÓN SAN SALVADOR FORMACIÓN CUSCATLAN FORMACIÓN BÁLSAMO FORMACIÓN CHALATENANGO FORMACIÓN MORAZÁN
Unidades sedimentarias mesozoicas-terciarias	GRUPO VALLE DE ÁNGELES GRUPO YOJOA FORMACIÓN TODOS SANTOS- FORMACIÓN METAPÁN ESTRATOS DE METAPÁN

6.2. Marco geológico local

El municipio de Jucuarán está situado al sureste de El Salvador y se ubica entre la llanura mareal de Jiquilisco y el valle del río Grande. En el área de estudio aparecen básicamente rocas efusivas pertenecientes a la Formación Bálsamo, definida por Baxter en el 1984 como una sucesión de rocas volcánicas efusivas básicas a intermedias, piroclastitas y epiclastitas volcánicas subordinadas. También aparecen materiales del cuaternario (Qf) constituidos por depósitos de estuario, barras costeras, depósitos aluviales y coluviales. Concretamente se pueden individualizar tres miembros en la formación Bálsamo representados en la tabla 6.2. donde se resumen las litologías encontradas en la zona.

Tabla.6.1.-Unidades litológicas de El Salvador. Baxter (1984)

La Formación Bálsamo caracterizó el episodio final del vulcanismo del Terciario superior (Plioceno, 5.3mill años). Durante esta fase, se depositaron grandes cubiertas piroclásticas emitidas en su mayor parte a lo largo de fracturas y en menor proporción desde aparatos centrales. Los productos de esta fase para el miembro B1 están definidos como epiclastitas volcánicas y piroclastitas. Caracterizados en la parte central del país como tobas aglomeráticas y andesitas. Las tobas aglomeráticas están constituidas por grandes bloques andesíticos de 20 a 50cm o mayores, redondeados, entremezclado por material piroclástico gris claro de grano medio del Plioceno tardío. Se encuentran en la parte superior del miembro intercaladas con corrientes de lava y algunas tobas ácidas. Las lavas son de tipo andesita hipersténica, augítica, porfídítica e hialopilítica. El miembro b2 esta definido como roca volcánica efusiva con presencia de epiclastitas y piroclastitas.

El miembro b3, constituido por rocas efusivas básicas-intermedias, se encuentra localmente con alteración hidrotermal, silicificación y limos rojos.

E DAD	**FORMACIÓN**	**MIE MBRO**	FACIES	**COMPOSICIÓN**	**MATERIALES**	***C NC1***
Holoceno	Formación San Salvador	Miembro Qf	Sedimentos de llanura mareal y litoral *	Basalto Andesita	Arcillas, limos, arenas	NC
			Coluviales/Conos de deyección		Arena , arcilla, grava semiangular	NC
			Aluviales *		Arena, grava, arcilla	NC
Pliocen o	Formación Bálsamo	Miembro b3	Rocas efusivas	Dacita Basalto Andesita	Cristalina (roca dura), Marginal enfriada y porosa	C

			Alteración hidrotermal		Limo, arcilla	NC
		Miembro b2	Rocas volcánicas efusivas	Dacita Basalto Andesita	Cristalina (roca dura), Marginal enfriada y porosa	C
			Piroclastitas	Basalto Andesita	Tobas finas, tobas lapiáceas, tobas vítreas	C NC2
			Epiclastitas		Bloques, gravas, arenas, limos, arcillas	NC
		Miembro b1	Piroclastitas	Dacita Basalto Andesita	Tobas finas, tobas brechosas	NC C

Tabla 6.2..- Clasificación de los materiales aflorantes en la zona de estudio, por edad, composición y competencia. Modificado de BAXTER 84 y JICA 97

** En algunos casos con intercalación de piroclastitas*

*1 Materiales consolidados **C** o no consolidados **NC***

2 Las Tobas finas a menudo se presentan poco consolidadas

A continuación se describen las diferentes litologías presentes en la zona suroeste del municipio. Podemos diferenciar como decíamos, las rocas volcánicas o efusivas, que se presentan principalmente en forma de coladas de lava, depósitos de escoria y tobas piroclásticas (coladas piroclásticas) y los depósitos sedimentarios más recientes, constituidos por depósitos por arenas de playa o barras costeras, depósitos de estuario, depósitos aluviales y coluviales.

Coladas de lava

Foto.6.1-.Colada de lava. Masiva fracturada no meteorizada.

Las coladas de lava, producto de la salida lenta del magma a la superficie terrestre, pueden diferenciarse según su litología, morfología y estructura interna. Estos parámetros varían según la composición del líquido magmático, la velocidad de enfriamiento del flujo y las características del medio donde se emplaza. Según su estructura interna se presentan de forma masiva y compacta o fracturada.

Visualmente las muestras de mano presentan una coloración oscura que indica que son rocas básicas pero es difícil precisar si se tratan de basaltos o andesitas. La realización de 2 laminas delgadas ha revelado una composición andesítico-basáltica general en la zona de estudio.

Concretamente se obtuvieron los siguientes resultados del análisis de las laminas delgadas:

Num_sig: 38	Coordenada (UTM): 360371/1462476
Roca andesitico-basaltica. Presencia de minerales de plagioclasa columnar en un 20%, con maclas de Calsbad. Algunos de estos cristales estan alterados a arcilla. Hay bastante mas presencia de clinopiroxenos que de ortopiroxenos, sumando en total un 15% de la composición. Esto indica una evolución de andesita a basalto según la serie de Bowen. La matriz tiene textura pilotaxitica y traquitica con cristales de feldespato. Se observa pirrita (sulfuro de hierro) que es un mineral opaco de forma cúbica. La matriz también presenta vidrio en muy poca cantidad.	

Num_sig: 39	Coordenada (UTM):361060/1463360
Roca andesitica piroxenica. Presencia de plagioclasa alterada en la que no se puede medir la extinción. Se encuentra en una presencia del 30% aproximadamente. Maclas de Calsbad presentes en la plagioclasa. También clinopiroxenos y ortopiroxenos en un 10%. La matriz tiene textura pilotaxitica (de flujo) con cristales de feldespato y piroxenos alterados que dan una coloración amarillenta. No hay presencia de olivino con lo que se puede descartar que sea basalto.	

Las lavas experimentan una fuerte contracción al enfriarse, ya que el volumen que ocupan una vez solidificadas es menor que el que ocupaban en estado líquido. Este hecho, produce la generación, en el interior del cuerpo de roca masiva, de diferentes sistemas de fracturas que forman los hábitos de retracción, también llamados disyunciones.

Los principales tipos de disyunción son columnar (que no hemos observado en nuestra zona) y lenticular. La disyunción lenticular o en lajas se produce cuando el flujo de lava está aún en movimiento y las burbujas de gas se disponen en planos paralelos a la dirección del movimiento. Estos planos, a medida que se enfría la lava, facilitan la formación de una fracturación horizontal que es más notoria en el centro de la colada de lava. Se ven además afectadas por la tectónica regional y local, denotada por una fracturación que afecta a toda la colada.

Foto.6.2.-Colada de lava disvunción lenticular o

Foto.6.3.-Colada de lava_disyunción en lajas con diaclasamiento. No meteorizada

Se observa en gran parte de los afloramientos donde puede observarse esta litología que la roca ha sufrido procesos que han alterado su estructura interna. Los diferentes procesos de alteración observados son: meteorización y alteración hidrotermal.

Las coladas de lava ya sea de forma masiva o en lajas presentan diferentes grados de meteorización y alteración hidrotermal.

El grado de meteorización no depende de una característica genética intrínseca de la roca sino que depende de la cantidad de tiempo que la roca está expuesta a agentes meteorizantes. Las rocas expuestas a meteorización se reconocen por presentar bloques redondeados individualizados de la matriz arcillosa que los sostiene. Esta estructura característica se conoce como disyunción bolar. Esta estructura interna que a menudo presentan las zonas mas externas de las coladas de lava, no se puede considerar un hábito de retracción. Esta escamación en forma de bolos en las coladas de lava, es producto de la meteorización de la roca volcánica, como consecuencia de la infiltración lenta de humedad a través de las fracturas de retracción ya existentes. De esta forma, la roca va adquiriendo cada vez más meteorización con el paso del tiempo, ya que el agua que circula por las diaclasas o fracturas, va transformando la roca en arcilla generalmente, y deja en su interior bloques redondeados muy susceptibles a la caída y al deslave. Esto se debe porque la matriz que se esta meteorizando no es lo suficientemente consistente para retener a la roca masiva en disyunción bolar que esta en su interior, y con una sobresaturación de agua o un

movimiento sísmico, esos bloques pueden derrumbarse llevándose consigo gran parte de la matriz.

Este fenómeno de meteorización se conoce como laterización bajo condiciones de clima específicos, tropical y ecuatorial. Las lateritas se pueden definir como horizontes edáficos fuertemente enriquecidos en óxidos e hidróxidos de hierro. Este enriquecimiento es consecuencia de la acumulación de estos componentes en respuesta a la meteorización química avanzada de una roca que ya previamente mostraba un cierto enriquecimiento en este componente. Están formadas mayoritariamente por hidróxidos y óxidos de hierro (goethita, lepidocrocita, hematites), a menudo acompañado de sílice o cuarzo, y de hidróxidos de aluminio y manganeso. En general estos minerales se disponen en agregados terrosos o crustiformes, formando capas de espesor muy variable, que puede llegar a la decena de metros. Se forman en zonas de relieve horizontal sobre rocas ricas en hierro, fundamentalmente sobre rocas ígneas básicas o ultrabásicas, ricas en minerales ferromagnesianos como el olivino o el piroxeno. La hidrólisis de estos minerales, a través de serpentina y clorita fundamentalmente, produce como productos finales óxidos/hidróxidos de hierro, sílice, y sales solubles de Mg y Ca (procedente de clinopiroxeno).

Los afloramientos donde aparece disyunción bolar avanzada, se podrían confundir con materiales coluviales. Sin embargo la disyunción bolar presenta una serie de rasgos identificables como uniformidad en la distribución de los bolos. Los bolos se presentan bien redondeados al igual que en los depósitos coluviales, sin embargo suele apreciarse en la mayoría de los casos, superficies de escamación indicativos de la condición evolutiva de la meteorización. A la vez se presentan en una matriz arcillosa de color rojizo que sostiene a los bolos, originada por la laterización.

Hemos observado que la meteorización de las coladas con retracción laminar no es tan intensa como la presente en los bolos. Teniendo en cuenta que la presencia de

diaclasas o fracturas facilita la meteorización, las coladas de lava que presentan menor grado de meteorización han estado menos expuestas a los agentes meteorizantes. Este es un indicativo del tiempo de exposición entre unos estratos y otros, pudiendo ser también un indicativo de edad relativa de las rocas.

Foto.6.6.-Colada de lava_disyunción en lajas. Falla vertical. Meteorización

Foto.6.7.-Colada de lava_disyunción en lajas. Alta fracturación y meteorización.Tendencia a

Foto.6.8.-Alteración hidrotermal. Caserio Jucuarán.

La alteración hidrotermal es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en términos químicos y termales, ante la presencia de agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma.

Se han observado diversos puntos de alteración hidrotermal afectando a las diferentes litologias donde se denota el importante cambio de las propiedadades físicas de la roca original.

La disposición en el espacio de las fracturas, la morfología y la situación de las lavas en el espacio de los afloramientos, parecen indicar que las coladas de lava corrieron a

través de los antiguos valles que, a menudo, coinciden con los valles actuales. Mediciones en la orientación de buzamiento de las lajas, nos pueden dar idea de la dirección que el flujo de lava debió adquirir. Los resultados revelan dos direcciones diferentes, según las lavas pertenezcan a la zona sur del municipio o a la zona norte. Cabe decir que la mayor parte del estudio se llevó a cabo en la zona sur-oeste, y por lo tanto es de donde se levantaron más datos. La dirección de buzamiento de las lajas en este zona sigue un patrón que abarca SSE–SSO (figura 6.1). En la zona norte, de la cual se tienen muchos menos datos y por lo tanto, deben considerarse con mayor cautela, la dirección de buzamiento predominante es NO (figura 6.2).

Figura 1

Fig.6.1.- Direcciones de buzamientos Zona

Fig.6.2.- Direcciones de buzamientos Zona Norte

La disposición de estas orientaciones nos llevan a interpretar que estas lavas pudieron fluir del actual cerro del mono el cual está actualmente extinguido y forma una cadena montañosa, pero que en el Plioceno fue el que pudo haber generado estas coladas de lava. Así la morfología de valles y montañas podía haber sido en aquella época similar a la actual. En la zona sur las lajas presentan orientaciones predominantes hacia el sur acorde con las laderas y valles que van a desembocar al mar. En la zona norte pasa lo propio con direcciones predominantes de NW, si bien ya se menciono antes hay pocos datos de esta zona.

Flujos piroclásticas_tobas

Las flujos piroclásticos se originan por el colapso de columnas eruptivas. Debido a este proceso se forman coladas piroclásticas, nubes ardientes y gases calientes. Los depósitos consolidados que se generan de este proceso reciben el nombre de tobas.

Podríamos definir la toba que aflora en nuestra zona como flujo piroclástico del tipo bloque-ceniza (J.V. Wright, 1988). Las coladas piroclásticas al fluir están controladas topográficamente. Los depósitos se presentan sin grano-clasificación en su parte más caótica. Suelen tener una matriz consolidada de color café, formada por cenizas y generalmente bloques líticos no vesiculados que pueden ser mayores de 5m de diámetro.

Alguno de estos bloques muestran fracturas de enfriamiento lo que indica que fueron emplazados como bloques calientes. La mayoría de los bloques provienen de la misma composición de magma en un porcentaje alto, dando lugar a depósitos monolitológicos. La nube ardiente portadora de cenizas y materiales clásticos de diferentes medidas avanza a ras de suelo y se encaja por los valles por donde fluye.

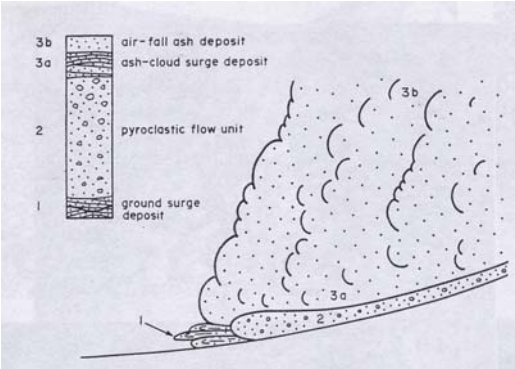


Figura 6.3.- Flujo pirovclastico (J.V. Wright, 1988)

Foto.6.9.-Toba con fragmentos centimetricos. Se miran bloques vesiculados.. Crio. Las Flores

Los depósitos, que recibe el nombre de toba, se presenta de forma consolidada aflorando en superficie en los actuales valles. Se presentan en alternancia con coladas de lava indicación de las diferentes pulsaciones de la erupción volcánica. La granoclasificación de las tobas es indicador de la unidad piroclástica en la que nos encontramos. Generalmente presenta granoclasificación decreciente, donde los fragmentos más grandes se encuentran en la base y progresivamente decrece el tamaño hasta fragmentos que pueden ser de medida ceniza.

Normalmente la toba no tienen una estratificación marcada ni una organización interna definida en su unidad de flujo piroclástico (ver figura de Wright) , y es frecuente que se encuentren compactos. Presentan potencias de 3 metros observables en los márgenes de las quebradas hasta los más de 25m con bloques mayores de 3m observables en Agua Fría. Normalmente la matriz de la toba es de grano fino y el color de alteración puede variar del amarillo al rojo oscuro confundiéndose el límite entre la roca y las arcillas que dan lugar a los suelos. En los niveles alterados pueden aparecer óxidos de hierro y manganeso.

Foto.6.10.-Unidad de flujo piroclástico en Agua

Foto.6.11.-Toba microgranular. Granos milimétricos. Caserío Majague

Normalmente los bloques presentes en la toba provienen de rocas basálticas andesíticas compactas y vesiculadas, incluidas en una matriz de color amarillento y disgregable con la mano. Puntualmente pueden incorporar bolos en avanzado estado de meteorización, donde se pueden observar las escamaciones. El propio avance del flujo puede provocar erosión y la incorporación de estos bloques.

Depósitos cuaternarios

Aluviales

Sedimento aluvial es el término general dado a los depósitos dejados por las quebradas o ríos; incluyen material fino como limo y arcilla y material grueso como arena y grava. El sedimento transportado es abandonado al disminuir la velocidad de una corriente.

Los depósitos aluviales se pueden encontrar en el propio cauce por pérdida de fuerza de la corriente, sobre los márgenes y llanura de inundación en los períodos donde se supera la capacidad soportable del cauce, en el piso del estuario interestratificados con sedimentos acarreados al mismo por el mar, y los correspondientes a deltas.

Las características torrenciales de las subcuencas del municipio hacen que estos depósitos sean abundantes en las partes bajas de las quebradas, donde se pierde la pendiente y como consecuencia la capacidad de arrastre de material. Ahí nos encontramos con formas de cono de deyección, formados por acumulación de sedimentos provenientes de la erosión de las aguas.

Tras el paso del huracán Mitch se vieron modificados los cauces existentes al ser transportado gran cantidad de material y de tamaños superiores a los 3 m. Este material proviene de la erosión del lecho el río y de las laderas, quedando depositado en las partes bajas afectando a cultivos, viviendas, infraestructuras, etc.

Coluviales

Los afloramientos de la formación bálsamo aparecen en ocasiones,cubiertos por materiales sueltos o unidos con una matriz a base de limo y arena fina a gruesa,que proviene de depósitos de inestabilidades gravitatorias de ladera llamados coluviales. Estos depósitos están formados por cantos de roca más o menos redondeados según su estado de alteración y la cantidad de transporte sufrido. Todos los bloques son de lavas o de fragmentos de toba, aunque esta última ofrece menos resistencia a los agentes meteorizantes, por lo

que los bloques provenientes de esta roca son erosionados con mayor facilidad. La de las lavas en bolos o cantos de aspecto rodado es mayor de lo que cabría esperar, sobre todo para los cortos desplazamientos sufridos por los materiales. El grado de redondez puede deberse a que en algunas partes de los afloramientos de estas rocas efusivas, hay disyunción bolar de las lavas. Esta disyunción bolar facilita la meteorización de la roca a partir de las fracturas y por consiguiente, si el grado de meteorización es alto, la erosión o lavado de la matriz dando lugar a desprendimiento de bloques. Estos fragmentos cuando caen en la ladera pueden llegar a formar acumulaciones de cierta importancia. (Ver capitulo 9. Análisis de Inestabilidad gravitatoria)

En la actualidad la mayoría de ellos ocurren en las laderas de las quebradas, por lo que estos depósitos son fácilmente erosionables por el paso de avenidas, removidos por las crecidas y depositados en barras, dispersados en la llanura de inundación o acumulados en algunos tramos del río. Se observan importantes paquetes de depósitos coluviales localizados en los ensanchamientos de los valles de las quebradas. Esto indica que aún después del Mitch son frecuentes estos paquetes de depósitos.

Debido a la alta dinámica de las quebradas y a la alta intensidad de los fenómenos que en ella ocurren, los depósitos coluviales y en general la morfología de los cursos de las quebradas varían en muy poco tiempo si consideramos una escala geológica.

Barras de arena y playas

Los materiales que se desprenden de las rocas, así como los que proceden de acarreados por los ríos, son transportados por el mar y depositados, de diversas formas, hacia las partes más bajas. Los sedimentos que se depositan en las partes bajas, son retrabajados por las corrientes mareales. El municipio de Jucuarán se caracteriza por una barra o isla alargada y dispuesta paralela a la línea de costa con algo más de once kilómetros y medio de largo. Su ancho varia entre un kilómetro y medio a menos de quinientos metros. El área definida es de algo más de seis kilómetros y medio. Esta barra es a menudo retrabajada por las olas y erosionada por las olas de tormenta. Las diferentes intervenciones del hombre en el medio, ya sea a nivel local (deforestación del bosque de mangle, deforestación de coqueras, ubicación de camaroneras, etc) como regional (represas a lo largo del Río Lempa) aceleran los procesos de erosión a los que actualmente se ve afectada la isla.

El transporte perpendicular a la costa se realiza por el avance de la ola o por el flujo de la marea alta, que empujan los materiales hacia la orilla, mientras que la resaca del oleaje y el reflujo de la marea, llevan estos materiales mar adentro. Las corrientes litorales o de deriva, resultantes de la acción oblicua del oleaje sobre el litoral, también transportan a los materiales con dirección a la costa.

Los fragmentos transportados varían en cuanto a su composición y tamaño, pero fundamentalmente son de tipo arenoso y arcilloso. El hecho de que estos materiales se depositen tanto en sentido transversal como longitudinal a la costa constituye un punto de referencia para establecer sus tamaños.

Los de mayor dimensión, como los grandes bloques de roca, los de tamaño medio y las arenas gruesas o medianas permanecen cerca de la costa, los fangos y barros, constituidos principalmente por polvos, precoloides y coloides son llevados mar adentro.

Las costas son caracterizadas por la acumulación de estos materiales. Cuando en ellas se deposita fundamentalmente arena, se forman las llamadas *playas*. Dichos materiales se depositan generalmente en lugares abrigados, como los fondos de ensenadas

o bahías, donde las corrientes marinas pierden fuerza. La fisonomía de las playas es muy diversa, según su pendiente, anchura y longitud, aspectos que cambian de acuerdo con el régimen del oleaje, las mareas y la profundidad del fondo.

En las zonas de aguas poco profundas se depositan arenas o cantos en el lugar donde el oleaje, la resaca y las mareas alcanzan un punto de equilibrio formando las *barras costeras*, las cuales, según sus características, pueden recibir diversos nombres, como *cordones litorales* y *restingas*, o *flechas*, que son salientes de la costa conformadas por arena gruesa.

Los materiales que se concentran inicialmente están cubiertos por el agua, pero conforme pasa el tiempo aumentan su altura hasta sobresalir de la superficie del agua y dar origen a la barra. Con frecuencia, estas barras crecen a partir de la punta de un promontorio y, por efecto de las mareas y el oleaje, pueden emigrar hacia la costa, cerrando una ensenada o una bahía, lo que origina una *laguna litoral* o *albufera*. Con el paso de los años la albufera se rellena de sedimentos marinos y fluviales. En ese momento, sus bocas que comunican al mar se cierran y tienden a desaparecer.

Humedales

Los humedales son ecosistemas terrestres o costeros, en donde el agua es el elemento predominante. Pueden estar inundados permanente o estacionalmente. Son hábitat muy importante para numerosas especies, y esenciales para la calidad de vida de las personas que viven cerca de ellos. Regulan los ciclos del agua, filtran la contaminación y protegen las costas de la subida del mar. De los humedales se extrae una gran parte de la pesca mundial.

Existen varios tipos de humedales. Entre los costeros están las salinas, los arrecifes de coral, los estuarios, las marismas y los manglares. Entre los terrestres se encuentran los lagos, las riberas de los ríos, los lodazales, las marismas, los pantanos, los estanques y las ciénagas.

Actualmente, los humedales sufren grandes amenazas producidas por las actividades humanas desmedidas: grandes asentamientos, drenajes agrícolas, caza y pesca abusiva, desecación, extracción de leña, acuicultura y complejos industriales, entre otros.

Foto 6.16.-Manglar

En nuestra zona la presencia más abundante es la de manglar. Los manglares son bosques de plantas leñosas tolerantes a la sal, caracterizados por su común habilidad para crecer y prosperar a lo largo del litoral, protegidos de las mareas. Se localizan entre sedimentos salinos frecuentemente anaeróbicos.

Los manglares están dominados por un grupo de especies típicamente arbóreas que han desarrollado adaptaciones fisiológicas, reproductivas y estructurales que les permiten colonizar sustratos inestables y áreas anegadas, sujetas a los cambios de las mareas de las costas tropicales y subtropicales protegidas del oleaje .

6.3. Marco tectónico regional

El origen de la intensa fracturación existente en la zona de estudio hay que buscarlo en las características geodinámicas de esta región geológica. Como se ha explicado anteriormente, éstas corresponden a las de una zona de convergencia entre dos placas, concretamente a la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe.

La fracturación de la roca se produce por la compresión que sufren los materiales debido a la intensa presión que supone la fricción de una placa al desplazarse bajo la otra. La dirección de máxima deformación coincide aproximadamente con la dirección perpendicular a la fosa tectónica del Pacífico, donde subduce la placa de Cocos, produciendo fracturas de dirección perpendicular a este desplazamiento y planos de fracturación oblicuos. Otras direcciones de deformación importantes corresponden a la de las fallas transformantes, normalmente paralelas a la dirección del movimiento y que acompañan y acomodan el movimiento relativo de los diferentes bloques.

En superficie, una gran diversidad de fallas se producirán por respuesta frágil de la roca a los esfuerzos producidos por el movimiento de las fallas principales.

Se conocen tres sistemas de debilidad tectónica, siendo el más importante, el sistema tectónico con dirección E-O, caracterizado por desplazamientos verticales considerables que atraviesan la República. Estos desplazamientos darán origen a la formación del graben o fosa tectónica. Se reconocen cinco ejes principales dentro de este sistema:

- Primer eje. Forma el límite sur de las montañas norteñas.
- Segundo eje. Se caracteriza por un vulcanismo individual apagado en la parte norte del país.
- Tercer eje. Se ubica al sur del segundo eje. Es el más prominente, con dislocaciones tectónicas (la más importante de ellas atraviesa el país, la fosa central) y con un vulcanismo individual joven, en parte todavía activo. También se encuentran depresiones volcano-tectónicas y cúpulas de lava. Los eventos sísmicos que aún ocurren en esta zona, indican que los movimientos tectónicos continúan.
- Cuarto eje. Se localiza en el Océano Pacífico a una distancia de 25 Km. de la costa salvadoreña y se caracteriza por una actividad sísmica frecuente.
- Quinto eje. Se encuentra al sur del anterior, formando una fosa marina que corre paralela a la costa salvadoreña y muestra cierta actividad sísmica. Existen elevaciones de

forma cónica que se levantan desde más de 3.000 metros de profundidad hasta el nivel del mar, considerándose éstas como volcanes.

La segunda dirección de debilidad tectónica más importante es NO-SE, con un sistema de fallas que algunas veces tienden a nortearse. Estas fallas se extienden a lo largo del país y, en ocasiones, aparecen como fisuras y alineamientos de eventos eruptivos, como el complejo volcánico de Santa Ana, San Salvador, San Vicente, Tecapa y San Miguel.

El tercer sistema, de fallas subordinadas, presenta una dirección NE-SW. Es menos evidente que los anteriores y se detecta principalmente en el centro y este de El Salvador.

La localización de los mayores volcanes refleja, aparentemente, lugares de intersección entre las dos direcciones principales. Volcanes tales como San Vicente, Tecapa, San Salvador, Usulután y San Miguel yacen en el límite sur del graben central, donde existe un control tectónico debido a las fallas de dirección NW-SE.

6.4. Marco tectónico local

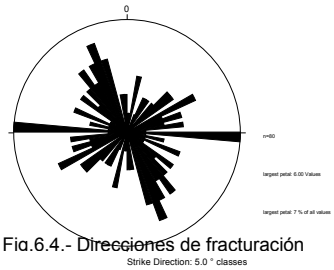


Fig.6.4.- Direcciones de fracturación

La estructura tectónica de la zona se ve afectado por tres sistemas de debilidad tectónica. El sistema E-O, y otros dos sistemas de fallas en disposición mas o menos ortogonal NE-SO y NO-SE. Estas fallas con direcciones NE-SO y NO-SE, más importantes que las E-O en incidencia del relieve, individualizan una serie de bloques con movimientos relativos de unos respecto a otros, resultando el levantamiento relativo de unas partes (horst) y el hundimiento relativo de las otras (gravens). Algunas de estas fracturas están condicionando la morfología del relieve, produciendo laderas escarpadas y dirigiendo la dirección de algunos valles. Ambas familias de fallas se cortan repetidas veces afectándose las unas a las otras, siendo difícil discernir cual de ellas actuó primero. Lo más probable es que ambas familias hayan estado activas a la vez, una dirigiendo la deformación por descompresión y las otras acomodando el movimiento de los diferentes bloques.

Foto.6.17.-Colada de lava encajada en antiguo valle.

Esta estructura a gran escala, se ve corroborada con la medición de las fracturas y las diaclasas que se observan en campo a escala de afloramiento. Así, la proyección estereográfica (herramienta para la representación gráfica de elementos estructurales o direcciones preferentes) de la fracturación, aunque da todo un abanico de direcciones, las direcciones predominantes son NO-SE y NE-SO (figura 6.4). También se han obtenido un numero considerable de mediciones con dirección E-O que tienen

su explicación en el marco tectónico regional mas que en la incidencia en el relieve.

Desde el punto de vista geomorfológico, se observa la influencia de la tectónica en las formas del terreno y en la red de drenaje. Así la componente tectónica provoca el cambio brusco del curso de las quebradas. De esta forma obtenemos, en los casos más extremos, cambios de orientación del curso de la quebrada de hasta 90º, es decir zonas preferenciales de migración de cauces. Con una lluvia intensa como fue la del Mitch, las quebradas obtienen un volumen de agua muy alto que adquiere una velocidad considerable, debido a la pendiente de las laderas y en muchos de los casos, el curso de agua erosiona zonas preferenciales de derrumbe y de migración de cauces. A la larga puede provocar inundaciones y destrozos de diversa consideración si hay actividad humana.

Recorridos

A continuación se muestran algunos puntos representativos con el objetivo de mostrar una simplificación e idea general del mapa 1:25000 y la presencia de la formación bálsamo en él, así como la visualización de las unidades en columna.

1- Quebrada. Pueblo Viejo Coordenada: 363396/1463296

(Figura 5). Presencia de andesita-basáltica de color rojizo en disyunción bolar con una potencia de 10m. Este basalto es ligeramente poroso generando una permeabilidad muy baja. Las medidas de los bolos oscilan entre 30 y 50cm y se observan diaclasas que se orientan 004/36O y 100/30E.

Por encima de este basalto rojizo observamos otro en disposición laminar con una potencia de 8m, en la ladera oeste de la quebrada. Se aprecian unas fracturas verticales muy importantes inaccesibles a medir.

Foto.6.18.-Afloramiento recorrido 1. Crio. Cabañas

Nuestro recorrido por la quebrada sigue con un pequeño paquete inferior a 4m de andesita basáltica en disyunción bolar con iniciación de meteorización. Por encima, volvemos a encontrar lajas orientadas 072/16E con alteración hidrotermal. Este afloramiento mide 2.5m donde el último medio metro es suelo arcilloso con intensa penetración de las raíces. La fracturación presenta orientaciones 000/75E y 072/71O

2- Quebrada El Cacao Coordenada: 362855/1467500

(Figura 6). La base de la quebrada presenta materiales coluviales provenientes de una gran inestabilidad gravitacional de ladera (1Km de ancho de cicatriz) que provocó el huracán Mitch. Todo el material fue transportado en forma de carga sólida por la quebrada

soterrando una comunidad entera llamada el Cacao. Actualmente esa comunidad se reubicó con el nombre de Espíritu Santo. El lecho de la quebrada mide 150 metros de ancho y hay presencia de bloques de 1.5m el de mayor diámetro.

Seguimos descendiendo la quebrada y nos encontramos con una lava andesítico basáltica masiva con un grado de meteorización bajo. La potencia de este afloramiento es de 3.60m con una capa de suelo de 40cm de vegetación densa. Hay grandes bloques individualizados por una importante presencia de diaclasamiento cuyas direcciones son: N142/49O, N74/38O, N100/51O.

La columna que obtenemos es la de una andesita-basáltica muy fracturada en la base, con textura granular y presencia de vesículas. Por encima una toba lítica de dureza media. Esta toba presenta clastos centimétricos y una fracturación de dirección N140/19O. Sigue la secuencia con un depósito de material coluvial y presencia de suelo.

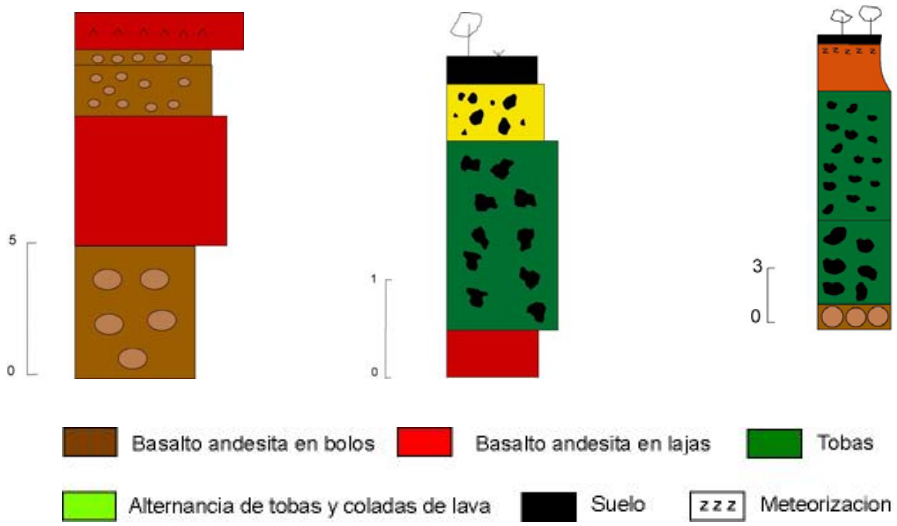


Fig.6.5.- Columnas estratigráficas. Recorrido 1,2 y 3 respectivamente

3-En la calle que lleva de la Ringlera al Espino Coordenada: 360539/1460807

(Figura 7). Aflora una colada de lava de composición andesítico-basálticos en lajas con orientaciones de buzamiento predominantes hacia el SO. Estos depósitos se encuentran con densidad alta de fracturación y en avanzado estado de meteorización. Siguiendo una

pequeña quebrada que desemboca en el rio La Ringlera, la litología cambia, y abajo del paquete de lava, nos encontramos con una toba lítica bastante meteorizada y con matriz disgregable con la mano, de color rojiza y textura limo. Sus clastos son de medida centimétrica. Debajo aparece otra toba con similares características pero bloques mucho más grandes de tamaño métrico.

En la base afloran andesitas-basálticas masiva con meterorización, que da lugar a disyunción bolar dentro de una estructura laminar.

Unidades litológicas y tectónicas

El mapa geológico 1:100000 donde los miembros de la formación bálsamo están definidos, se ha tomado como base del mapa 1:25000. Dado que nuestra escala de trabajo era más pequeña, nuestro estudio da nuevas aportaciones litológicas y también tectónicas, del mapa mas general.

A rasgos generales se diferencian zonas de coladas lávicas con diferente tipo de retracción. Una gran colada andesítico basáltica en lajas se dispone ocupando los caseríos de Pueblo Viejo, la Ringlera y la Longaniza. Las orientaciones de buzamiento de estas lajas siguen una disposición hacia el SO, indicando la dirección de movimiento del flujo. Esta unidad se ve afectada por diferentes fallas de importantes dimensiones (8 Km. aprox.) que la delimitan. La meteorización en esta zona no es especialmente intensa y se concentra precisamente a lo largo de las dos fallas principales de dirección NE-SO (figura 6.6.). Sin embargo, teniendo en cuenta los buzamientos de las capas, en algunos lugares pueden ser propensas al deslave. En la parte occidental afloran coladas de lava andesítico basálticas que presentan grado de meteorización de diverso grado. Esta zona es bastante amplia. Se caracteriza por no presentar grandes elevaciones y su parte más elevada presenta una morfología llana. Esta unidad que estratigráficamente se encontraría por encima de las lajas anteriormente descritas, está a un nivel topográfico inferior. Este echo puede ser debido al sistema de fallas tanto NE-SO como NO-SE. Así se explicaría la morfología plana que presenta, ya que podría tratarse de una antigua superficie de erosión. Como resultado de esta superficie, la parte alta de los cerros de la zona intermedia y baja tienen una pendiente moderada, que además se continua de una loma a la siguiente aún en cotas topográficas diferentes. Estas diferencias topográficas son las que producen los saltos de falla entre los diferentes bloques.

Dentro de esta unidad cabe resaltar la presencia de una colada basáltica encajada en la Quebrada del Quebracho (cerca de la Loma el Calabozo) coordenada UTM 358211/1461396 . El origen de esta colada es desconocido (quizá forme parte de la colada descrita anteriormente). Lo que se observa es su disposición a lo largo de la quebrada,

siguiendo la morfología de ésta y disponiendo sus laminas en buzamiento vertical en las zonas de cambio de dirección del lecho.

En la parte norte oriental pasa una situación similar en cuanto a la vasculación de los bloques debido al sistema de fallas. Su disposición topográfica es también inferior al bloque central constituido por lajas. La litología en este punto está constituida por andesita basáltica en disyunción bolar. En esta zona se observa la presencia de alteración hidrotermal. La litología muestra coloraciones amarillentas-anaranjadas, y también moradas. Los afloramientos se presentan con textura roca, pero alterados de tal forma que se ven pequeñas formaciones de sílice por aquellas diaclasas donde ha podido fluir el agua. Esta presencia de alteración hidrotermal, también la encontramos en la zona del caserío el Coyol y el Llano. Estas alteraciones se disponen cerca de estructuras de falla, lo que puede indicar que por esas fracturas hubo una circulación importante de agua que afectó a esos materiales.

En algunas zonas, como al norte de la misma población de Jucuarán, aparecen alteraciones hidrotermales generando bandas de diferentes coloraciones y descohesión, disminuyendo las propiedades de resistencia mecánica originales de la roca.

Comparación con el mapa de la misión alemana

Las tobas provenientes de coladas piroclásticas, se encajan por las zonas topográficamente más bajas, es decir los valles y paleovalles que en aquél entonces había en la zona. En esta unidad hemos apreciado una importante diferencia respecto a lo cartografiado por la misión alemana. Esta unidad descrita en el geológico E-1:100000 como b1 con lapilli de pómez, no parece presentarse en el campo. Si bien había una presencia dentro de la toba de fragmentos escoriáceos de color rojizo, en ningún momento se observó la inclusión de lapilli de pómez en la toba.

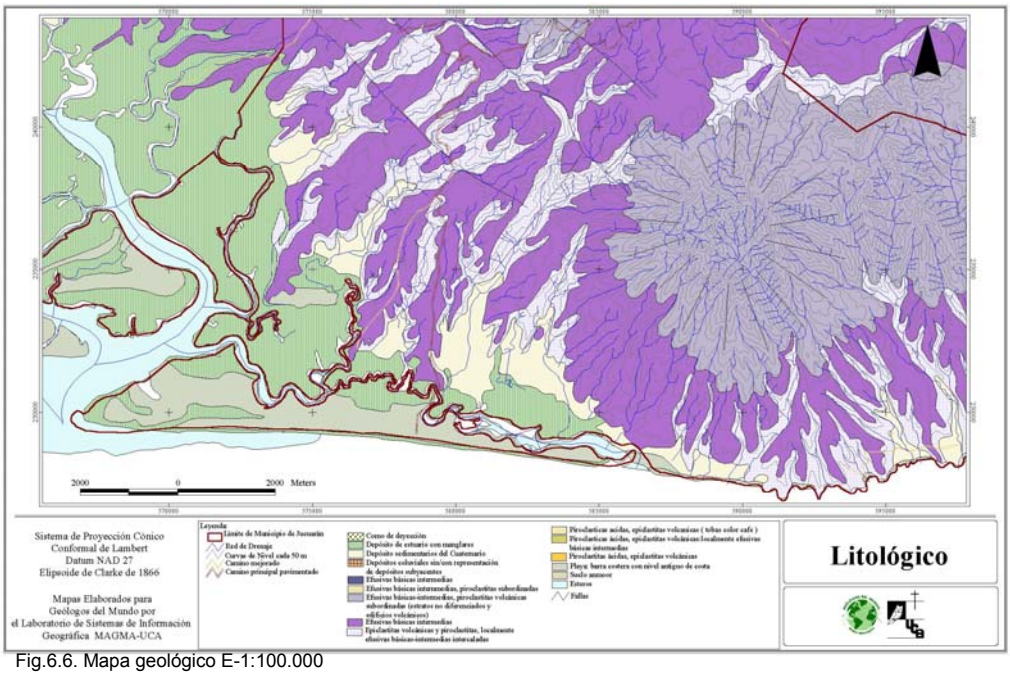


Fig.6.6. Mapa geológico E-1:100.000

Otro de los puntos en que se difiere es la potencia que el geológico muestra de las piroclastitas. La potencia más grande observada en campo es la de la loma Monte Fresco (en la Quebrada Seca) con una potencia de 40m. La demás presencia de toba se encuentra, estrictamente, en el fondo de las quebradas con potencias no superiores a los 20m. Otras zonas visitadas que constaban como piroclastitas en el 1:100000, resultaron presentar andesita-basáltica en disyunción bolar, como es el caso de las quebradas que van de Valle Seco a las Flores.

Mención especial se debe dar a las coladas piroclásticas que encontramos en Agua Fría donde se observan bastos depósitos de toba (hasta 25m), con bloques de hasta 5 metros. Estos bloques presentan una organización o disposición en bandas granulométricas que indican un sentido de flujo N-S. Estos depósitos han alcanzado la línea de costa y la acción erosiva del mar ha creado cavidades como en el lugar llamado La Ventana.

La interpretación tectónica de la misión alemana sobre nuestra zona explica que afloramientos de la parte sur tienen un límite bastante pronunciado consistente en alineaciones alternas de tendencia E-O y NO-SE. Estas alineaciones se supone que son las fallas deducidas de la zona costera del Bálsamo y Jucuarán, con direcciones E-O y NO-SE (Gerd Wiesemann, , 1975). En la representación estereográfica de la disposición de las fracturas de la zona, se observa la evidencia de la presencia de fracturas orientadas NE-SO que coinciden, de hecho, con las orientaciones que adoptan las quebradas. Estas fracturas no se contemplan en el mapa geológico E-1:100000 y su consideración es importante, ya que influyen en la geomorfología del terreno, meteorización, susceptibilidad a deslaves y circulación de agua. Estas fallas no solo se han deducido de la introducción de datos en la representación estereográfica, sino que se ha constatado su presencia en mapas topográficos, fotos aéreas y físicamente en el campo. Otras estructuras que solo se han podido deducir de la observación de la foto aérea, son formas circulares a veces de dimensiones bastante grandes (casi quilométricas), asociadas a antiguas calderas que parecen coincidir con las zonas de mayor erosión.

6.5.Marco geomorfológico

La geomorfología (geo-tierra, morfo-forma, logía-ciencia) es la ciencia de la tierra que estudia el relieve de la superficie terrestre, formas; y su evolución, los procesos activos que se dan, procesos internos y procesos externos. Los procesos internos, son aquellos procesos relacionados con la actividad interna de la tierra como vulcanismo, subducción, sismicidad, etc. Suelen considerarse los procesos formadores del relieve. Los procesos externos o procesos que tienen lugar sobre la superficie de la tierra son aquellos que van a

proceder al desmantelamiento de las formas creadas por los procesos internos. Entre ellos podemos mencionar, la erosión provocada por la lluvia, erosión de los ríos y quebradas, erosión por la acción de las olas en la zona de costa, meteorización de las rocas, sedimentación, etc.

A la vez, las diferentes formas del terreno condicionan el tipo de procesos asociados y la intensidad de éstos, ya que determinan factores como los regímenes de precipitaciones, el funcionamiento de la red de drenaje o la formación de suelos.

Las diferentes formas del terreno son el resultado de la interacción de los procesos geológicos internos y los externos, y estos a la vez están condicionados por las formas del terreno.

Por tanto, el conocimiento del relieve es un elemento de suma importancia para entender los procesos naturales que tienen lugar en el municipio, ya que las características del relieve: pendiente, forma, etc. son indicadores de los procesos que se van a tener lugar. Las zonas de fuertes pendientes suelen presentar una susceptibilidad alta a inestabilidades del terreno. Caracterizando el terreno según las características que presenta, quedan delimitadas las zonas más o menos adecuados para ordenar las actividades del hombre. Es por tanto una herramienta importante para proyectar el ordenamiento territorial, teniendo en cuenta la gestión del riesgo.

La complejidad de la geomorfología a la hora de definir estas unidades y subunidades básicas para el ordenamiento territorial, se simplifica si la desglosamos en diferentes parámetros: Cada unidad o subunidad queda descrita según algunos de estos parámetros que la hacen definible y diferenciable de las otras.

Morfométricos: elevación del terreno, pendiente del terreno, orientación de las laderas

Morfológicos o formas del terreno: onduladas, cónicas, estrechas...

Morfodinámicos o procesos activos: procesos de erosión hídrica (ríos, quebradas, erosión superficial, erosión mareal o de la costa), procesos de erosión gravitatoria (movimientos en masa, erosión superficial)

En el presente apartado se contextualiza a nivel regional, divisiones de todo el territorio salvadoreño; y local, divisiones del municipio de Jucuarán, la geomorfología característica del municipio de Jucuarán. Se presenta además la cartografía geomorfológcica del municipio a E-1:25.000. Anexo 1- Su realización se ha efectuado mediante observaciones de campo y el análisis e interpretación de fotografías aéreas y mapa topográfico a escala 1:25.000.

6.5.1. Marco geomorfológico regional

En función del origen geológico estructural, determinado por los procesos tectónicos regionales que afectan al conjunto de América Central, se diferencian las siguientes unidades geomorfológicas : Planicie costera, cadena costera, fosa central, cadena interior,

fosa interior y montaña frontera. Sin embargo, aunque se puedan distinguir seis unidades no debe olvidarse la ínter-actuación entre estas, es decir, los procesos generados en una unidad implican una respuesta en otra unidad. Un ejemplo que muestra esta relación se puede observar en la formación de relieve de una unidad como la cordillera volcánica alineada sobre la Fosa Central donde se dan procesos de erosión. El sedimento erosionado transportado principalmente por ríos y quebradas pasará a formar parte de otra unidad, en este caso de la planicie costera. El sedimento queda depositado en forma de delta en la desembocadura y llanura de inundación o es removido por la acción de las mareas modificando y dando forma al sedimento en forma de barras de arena.

A continuación se describen la unidades geomorfológicas que comprenden El Salvador para entender en la geomorfología local las relaciones que influyen en su evolución. El orden de las unidades descritas va de Norte a Sur pudiendo mostrar de esta manera el ciclo de la Tierra. La formación de relieve debida a los procesos internos (zona de subducción) dando lugar a los diferentes relieves. Positivos: montaña fronteriza, cadena interior, cadena volcánica, cadena costera. Negativos: Fosa interior, Fosa Central, Planicie Costera. Y La erosión de este relieve y la disposición de este en zonas más bajas o relieves negativos.

Montaña fronteriza

La Montaña Fronteriza comprende un 25% del país. Está constituida por dos elementos estructurales, los cuales geológicamente son bastante heterogéneos, formaciones de Metapán y Chalatenango, en parte formada por rocas intrusivas. Las alturas máximas de la Montaña Fronteriza oscilan entre 1500 y 2500 m.s.n.m. y abarca grandes extensiones.

Fosa Interior

La fosa Interior es la unidad geomorfológica más pequeña del país, ocupando un 5% de su territorio. Situada al NE, cuenta con una longitud de 70km. Desde el punto de vista morfológico, su extremo Oeste es una planicie, que se encuentra rellenada de material epiclástico. El extremo Este es menos pronunciado, constituido por tobas.

Cadena Interior

La Cadena Interior abarca un 20% del país. Al oeste limita con la fosa central y la fosa interior. Al este, se une con la montaña fronteriza, por la ausencia de la fosa interior en esta zona. Su altura oscila entre 700 y 1000 m.s.n.m. Está formada aproximadamente por diez plegamientos, y petrográficamente formada por aglomerados volcánicos. Una de las características de esta unidad es el estar formada por volcanes que geológicamente están inactivos o apagados y bastante erosionados, como el Sihuatpeque, el Guazapa o el Cacahuatique.

Fosa Central

La Fosa Central comprende un20% de la superficie del país. Se extiende a lo largo de éste con un rumo ONO-ESE, limitada tanto al norte como al sur, por escarpamientos de diversas alturas. Su ancho varía entre 10 y 30 km. La morfología de esta unidad está ligada estrechamente a las condiciones geológicas de la misma. Los desplazamientos tectónicos de la Fosa Central han ocurrido a lo largo del tiempo, varían de 1 a 1.5 km, asumiéndose que en los lugares de mayor altura los desplazamientos han debido ser muy intensos.

En lugares como San Salvador o Usulután, el ensanchamiento de la fosa es bastante visible. Los cuatro plegamientos de la Cadena Costera están estrechamente conectados con los grandes macizos volcánicos de la Fosa Central, que constituyen los estrato volcanes. En esta franja volcánica se encuentran asociados los volcanes de Santa Ana, Izalco, San Salvador, San Vicente, volcanes de la Sierra de Tecapa-Chinameca y San Miguel. La intensa actividad eruptiva reciente ha dado lugar a la formación de estos edificios volcánicos, la mayoría de ellos con laderas inestables, formados por materiales volcánicos jóvenes y poco consolidados. Esto hace que, al encontrarse sometidos a la continua acción erosiva de los agentes geológicos externos, especialmente precipitaciones muy intensas durante el período de invierno y a la acción continua de los agentes geológicos internos, conformen unas unidades de relieve muy vulnerables a los procesos erosivos. Pueden entenderse como elementos que aportan gran cantidad de sedimento para la formación de la planicie costera.

Petrográficamente están formados por los siguientes elementos: materiales piroclásticos y lavas. El espesor de los materiales varía de 400m. a 800m.

Cadena costera

La cadena costera o cadena volcánica, constituida por las cordilleras del Bálsamo y Jucuarán, cubre igualmente un 12% de la superficie salvadoreña. La altura máxima de esta unidad es de 1.200m. y su ancho varía de 15 a 20km. Petrográficamente está formada de aglomerados volcánicos gruesos y densos, intercalados por niveles delgados de lava andesítica y estratos de tobas e ignimbritas, integrando una serie con un espesor de 1500m.

Planicie Costera

La Planicie costera comprende dos zonas ubicadas el oeste y en el centro del país, abarcando ambas algo más del 12% del territorio nacional. En lo que respecta a su petrografía y origen, no existe uniformidad alguna. Los ríos que descienden de las regiones montañosas, situadas al Norte de esta unidad, transportan anualmente hacia el mar un gran

volumen de agua de lluvia, lo cual ha contribuido decisivamente a la formación de la planicie, con el aporte de carga en suspensión que es depositada en estas áreas. Por tanto, es imprescindible entender la planicie costera como la parte baja de las cuencas siendo su evolución dependiente de las condiciones que imperan en cada cuenca o de las acciones del hombre que modifican el ciclo natural como pueden ser las presas de agua en los ríos. Parte del material que naturalmente baja y se diposita en la planicie costera queda retenido en las presas.

6.5.2. Marco geomorfológico local

El Municipio de Jucuarán comprende gran parte de la cadena costera de oriente conocida como cordillera de Jucuarán uno de los elementos orográficos más notables del departamento de Usulután, junto la Sierra Tecapa-Chinameca. Sin embargo no hay que olvidar que el municipio abarca en su lado poniente parte de la bahía de Jiquilisco y en su lado norte la llanura de inundación que en este tramo desarrolla el Río Grande de San Miguel donde podemos destacar la presencia de la laguna del Jocotal.

El Municipio de Jucuarán por tanto esta íntimamente relacionado con las demás unidades geomorfológicas además de la cadena costera. En sus lados sur y poniente se relaciona con la Planicie costera formada por la parte baja de la cuenca del Río Lempa, concretamente con la bahía de Jiquilisco. La Bahía depende a su vez de la influencia de las demás unidades recorridas por el río más extenso de El Salvador. En su lado Norte, limita la Fosa Central, donde el limite municipal coincide con la parte baja del Río Grande de San Miguel. Los procesos que se dan en las demás unidades que recorre este Río nacido en la montaña fronteriza dejarán sentir su influencia en la parte norte del municipio de Jucuarán, donde el rió se caracterizar por una amplia llanura de inundación. Algo más al Norte, perteneciente al departamento de San Miguel, emerge el Volcán Chaparrastique, volcán activo, con una altura de 2130 m. La Cordillera de Jucuarán se prolonga hacia el oriente paralela a la costa hasta Chirilagua e Intipucá.

La geomorfología que comprenden los límites administrativos del municipio de Jucuarán no coinciden totalmente con los límites naturales físicos. Quedan diferenciadas de modo general tres unidades geomorfológicas en el municipio de Jucuarán. Dentro de estas tres unidades se describen además subunidades.

Cordillera de Jucuarán

Se considera el rasgo más característico ya que ocupa más de un 77% del área total del municipio de Jucuarán, presentando una elevación máxima de 883 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m). La cordillera de Jucuarán destaca su elevación entre las demás unidades

que la rodean. Al norte desciende hasta los 30m de altura respecto al nivel del mar, por donde discurre el Río Grande de San Miguel. Al Sur y Suroeste, se destaca sobre la bahía y el océano Pacífico, perdiendo la elevación hasta nivel del mar. Se trata pues de una diferencia de elevación de más de 800m. Las diferentes estructuras o complejos volcánicos y la erosión diferencial que presenta esta cordillera da lugar a la presencia de diferentes zonas elevadas o cerros y diferentes depresiones de forma cóncava o zonas hundidas de las diferentes subcuencas que conforman la red de drenaje de la cordillera. Se caracteriza por presentar fuertes pendientes, principalmente en las laderas de las quebradas con mayor encajamiento. Los procesos que se dan en esta unidad de relieve son principalmente erosivos.

La cordillera esta conformada por un conjunto de cerros en la zona norte y zona sur.

Estructuras o complejos volcánicos de morfología cónica

A pesar del grado de erosión de estos complejos volcánicos extintos en la actualidad se observan morfológicas cónicas típicas de edificios volcánicos. Edificios volcánicos formados por las diferentes fases eruptivas que dieron lugar a intercalaciones de coladas de lava y sedimentos poco consolidados fácilmente erosionables. Se disponen a modo de estratovolcán donde la red de drenaje se encaja de forma importante y en disposición radial dando lugar a cuencas largas y estrechas que presentan diferentes grados de evolución. Se caracterizan por presentar la zona de emisión o cráter altamente erosionado o desmantelado. Sin embargo, aún se pueden distinguir algunas de las zonas erosionadas rasgos en forma circular típica en forma de cráter.

Se diferencia una complejo volcánico cónico en la zona Norte y otro complejo en la zona Sur. Estos dos complejos volcánicos dan diferentes formas del terreno según la influencia litológica, tectónica y de evolución de la red de drenaje. En el complejo estructural de la Zona Sur se observan de manera general laderas más estrechas y alargadas de pendientes mayores que en la Zona Norte.

Parte alta- relieve 800m- Zona de Recarga, Procesos de erosión

Las partes altas de estos edificios volcánicos son las máximas elevaciones que presenta el municipio. Se caracterizan por presentar las pendientes más abruptas en sus laderas predominando las pendientes entre 30-50 grados.

En la zona Sur destaca la elevación máxima es de 883m.s.n.m del Cerro el Monito. Destacando también el Cerro El Mono con una altura de 814m.s.n.m. Del orden de los 600m destacan el Cerro El Gavilán y Cerro El Chino. En la Zona Norte la elevación máxima la presenta el Cerro La Misión con 767m, seguido de la Loma Las Peñitas con un saliente de 764m y Cerro La Vigía con 746m entre los que se ubica el área urbana de Jucuarán. Otros de los cerros característicos son Cerro Azul, Cerro el Duende, Cerro La Zapata, Cerro Joya Verde del orden de los 600m de altura.

La red de drenaje existente en el volcán nace en estas áreas y discurre ladera abajo a favor de zonas de debilidad tectónica (líneas de fallas) o litológicamente más alteradas. La red de drenaje se encuentra intensamente encajada dando lugar a la formación de ríos y quebradas en cuyas laderas tienen lugar la mayor parte de las inestabilidades identificadas. Los procesos de erosión hídrica y gravitatorios, deslizamientos y desprendimientos, se desarrollan con una gran intensidad. Éstos se alimentan respectivamente dando lugar a encajamientos de dimensiones cada vez mayores y vertientes abruptas en las quebradas. Es conveniente mantener cierto control sobre estas zonas de encajamiento, ya que es aquí donde puede iniciarse un proceso de erosión remontante y la consiguiente creación de una zona de cárcava de difícil recuperación.

Desde el punto de vista hídrico, la ladera alta y media definen las zonas de recarga de los mantos acuíferos. En la actualidad, la zona urbana de Jucuarán y cultivos temporales o pastos se ubican en esta unidad, condicionando y acelerando los procesos activos (erosión hídrica y erosión gravitatoria).

Parte media- lomas- procesos de transporte y arranque de material.

Esta parte se caracteriza por presentar pendientes medias entre los 15 y 30 grados: este cambio de la pendiente de las laderas también se encuentra en los cursos de las quebradas que drenan esta parte proveniente de la parte alta. Destacan algunos accidentes tectónicos o litológicos que suponen escalones para estas quebradas. Básicamente el proceso mayoritario que tiene lugar en esta parte es el de transporte, desde el material arrancado en la parte alta, hacia la parte baja. Hay que destacar, sin embargo, que también tienen procesos de aporte de nuevos materiales provenientes de estas laderas, ya se por escorrentías superficiales, ya sea debido a movimientos originados en inestabilidades de ladera.

Parte baja-conos de deyección o llanuras de inundación- zonas de sedimentación

Las partes bajas o faldas de estos complejos cónicos se caracterizan por presentar pendientes predominantes menores de 15grados. Se observan pendientes superiores en algunas de las laderas, principalmente en las laderas interiores o de quebrada alcanzando en algunos casos pendientes entre 30-50grados. Las partes bajas de las quebradas también se caracterizan por presentar un importante cambio de pendiente. Este cambio de pendiente, define el cambio de energía del flujo, es decir, entre los procesos de erosión y los de sedimentación. Esta disminución de la energía da lugar a la formación de unidades definidas como áreas de inundación o sedimentación, coincidentes por tanto con los depósitos aluviales.

Bahía

La bahía corresponde a una llanura de inundación de un estuario que se abre sobre una llanura mareal con influencia de las olas y parcialmente cerrada por una barra de arena o flecha. Sobre esta llanura se ha desarrollado un bosque salado o mangle. En el caso de la Bahía de Jiquilisco es parte del delta del Río Lempa, concretamente al oriente de este sometida a la acción de las mareas. Podemos diferenciar tres elementos o subunidades: la zona de estuario con manglar, la zona propiamente de esteros y la barra de playa o arena; las cuales se caracterizan por formarse al nivel del mar, por lo que su elevación y pendientes son mínimas. Los procesos más característicos de esta unidad son debidos a la influencia mareal (modelación, inundación y erosión) y procesos de sedimentación de los ríos y quebradas que van a dar a la bahía.

.

Estuario de manglar- Zona de depósitos

Zonas de inundaciones aluviales de recurrencia anual, como parte natural de este ambiente. En la llanura mareal se han identificado 8 estuarios, 4 canales y 3 bocanas así como cuatro islas totalmente cubiertas por el manglar. Este bosque juega un papel fundamental como elemento definitorio del paisaje y de las dinámicas posibles, protegiendo de la erosión y sirviendo e interfase entre los ambientes salados marinos y los dulces continentales.

Las actividades actuales del hombre están modificando su evolución. (Camaroneras y tala)

Estero- Canales mareales

Las subidas y bajadas del nivel del mar definen las zonas de inundación o área limitada entre la línea de costa de marea baja y de marea alta donde los brazos de los esteros crecen tierra a dentro. En la llanura mareal se han identificado 4 canales y 3 bocanas. La energía de las mareas al penetrar sobre la llanura va disminuyendo, dando lugar a la característica morfología sinuosa de los esteros. En estos brazos se remueven las partículas más finas de sedimento.

Barra de Arena o playa

Moldeada por las corrientes mareales la barra o isla alargada y dispuesta paralela a la línea de costa tiene algo más de once kilómetros y medio de largo. Su ancho varia entre un kilómetro y medio a menos de quinientos metros. El área definida es de algo más de seis kilómetros y medio. Esta barra es a menudo retrabajada por las olas y erosionada por las

olas de tormenta. La tendencia actual es la de una rápida erosión que empieza a afectar más allá de la barra de arena.

Llanura de inundación aluvial Río Grande de San Miguel

La llanura de inundación del Río Grande de San Miguel caracteriza la zona norte del municipio. Se caracteriza por su baja pendiente y por quedar inundada en diferentes periodos. Aún no pertenecer la mayor parte de esta llanura a los límites administrativos del municipio, afecta a las pocas áreas llanas de este.

Conos de deyección

La morfología de los conos de deyección, con forma en planta de abanico y bajo ángulo en sección vertical, está condicionando el curso de los torrentes. Algunos cursos se encajan bordeando estas estructuras. Los que transcurren sobre ellas presentan normalmente estructuras más ramificadas y menos encajadas debido a la propia morfología del cono, de pendientes más suaves y sin un gradiente definido en una sola dirección. Se han identificado dos tipos de conos de deyección, asociados a las quebradas y asociados a las laderas del volcán.

Estos últimos se ubican en la ladera media del volcán. Estarían asociados al proceso de formación de la estructura volcánica, durante el periodo de actividad eruptiva. El propio flujo de las lavas va dando lugar a esas formas abombadas. No han sido cartografiados por considerarse que existe una tendencia general en toda la ladera a esta morfología.

En cuanto a los conos asociados a las quebradas se han identificado en la ladera baja. Su génesis puede explicarse como el resultado de un proceso de sedimentación del material que ha sido erosionado y desprendido progresivamente de dichas quebradas, transportado durante los regímenes torrenciales hasta estos lugares en los que el flujo perdería velocidad y capacidad de transporte de carga sólida. Coinciden con las máximas áreas de inundación identificadas en el mapa de áreas inundables.

Inestabilidades

Las inestabilidades concebidas como formas del terreno producidas por procesos gravitatorios que asociadas a las unidades geomorfológicas han sido cartografiadas con el

fin de localizar y de observar la densidad en los diferentes tramos de ladera. (ver capitulo 9.Inestabilidades gravitatorias)

Cicatrices de deslizamiento

Delimitan la cabecera de los movimientos gravitatorios. Se han cartografiado las cicatrices de las inestabilidades observadas directamente en campo, así como otras identificadas mediante observación de fotografía aérea. Se diferencian cicatrices recientes y cicatrices fósiles.

Depósitos de coluvión

Son las zonas en que se acumulan los materiales movilizados por las inestabilidades. Los procesos de inestabilidad pueden dar lugar a depósitos de volúmenes importantes y por tanto cartografiables a la escala de trabajo. Se asocian especialmente al pie de taludes por acumulación de material producto de las inestabilidades. Es necesario destacar que mucos de estos depósitos tiene una vida media corta, ya que los mismos procesos de arrastre y erosión de las quebradas pueden acaba con ellos rápidamente.

7. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La calidad de vida de las personas está relacionada con una buena calidad ambiental, y por tanto, esto incluye también un buen estado del recurso hídrico, tanto en cantidad como en calidad.

El agua cada vez escasea más en todo el mundo, sobretodo debido a efectos de mala gestión del territorio, que incluye desforestaciones, contaminación por diversos factores y sobreexplotación del recurso hídrico.

En este sentido, ya hace unos años que la población ha tomado conciencia sobre el tema y se empiezan a llevar a cabo acciones para solucionarlo, o al menos, para evitar continuar con la mala gestión.

El municipio de Jucuarán no se escapa de la problemática. Aunque todavía no existe una sobreexplotación del recurso hídrico, el agua no es abundante en esta zona debido a la naturaleza de los materiales geológicos que la forman. A más, la prácticas utilizadas en campo (fertilizantes, pesticidas…) y el descontrol en temas de basuras y aguas residuales conllevan una disminución de la calidad del agua, tanto superficial como subterránea.

Con el presente trabajo se ha intentado aportar datos a cerca del funcionamiento de los acuíferos detríticos y volcánicos de la cuenca SW del municipio de Jucuarán, con una extensión de 95.5 km^2.

La mayor parte de las captaciones de la zona están destinadas fundamentalmente al abastecimiento urbano. Las captaciones en forma de pozos, se concentran en el acuífero detrítico de materiales cuaternarios de quebrada, mientras que en los materiales que conforman las zonas más altas del municipio, la población se abastece de manantiales.

La relación existente entre el acuífero cuaternario y las lavas no es bien conocida, y no existen suficientes datos para establecerla. Pero en una primera aproximación, se contempla que éstos no están conectados, sino que forman dos sistemas diferentes. Si existe conexión, solo es posible a través de fallas, de las que se carece de información.

Para la obtención de los parámetros hidráulicos no se ha podido contar con ningún ensayo en la zona, ya que no existen pozos profundos donde poder realizarlos. Así, los valores usados siempre se obtuvieron de la bibliografía, y son de dudable fiabilidad.

En el estudio piezométrico se han considerado un total de 138 puntos de agua, entre pozos y nacimientos distribuidos en toda la cuenca. Estos datos han permitido trazar un mapa de isopiezas que pone de manifiesto la correspondencia entre la cuenca de aguas superficiales y subterráneas, debido a que todos los pozos explotan acuíferos superficiales.

Se ha contado con l7 análisis químicos realizados en el año 2001 y 26 realizados en este estudio, y se han estudiado los resultados obtenidos.

El balance hídrico se elaboró para toda la cuenca, aunque con los valores obtenidos, el balance se concentra en el acuífero detrítico de las quebradas. Éste ha permitido tener una orientación sobre la situación dinámica de los recursos del acuífero.

Los habitantes del municipio de Jucuarán están organizados en comités de agua y/o de salud. El comité de aguas se encarga del cuidado y distribución del agua a las comunidades, y el de salud procura por la calidad de ésta. Es importante el papel de estas organizaciones para llevar un buen control del recurso hídrico, ya que nadie más que los propios usuarios puede darse cuenta de los problemas que puedan surgir.

El agua es un recurso muy preciado, indispensable para la vida y el desarrollo, y por tanto se debe realizar una buena gestión de ésta, evitando la sobreexplotación y la contaminación a través de actividades antrópicas.

7.1. Formaciones hidrogeológicas

En este capítulo se pretende definir zonas del municipio con un mismo comportamiento hidrogeológico, para posteriormente realizar un balance hídrico y tener una orientación sobre la situación dinámica de los recursos del acuífero. Se ha creado un mapa de zonas para el balance hídrico y un mapa geológico que se puede ver en el Anexo 1. A continuación se introducen algunas definiciones de conceptos hidrogeológicos usados en este apartado.

Las definiciones de formación hidrogeológica y unidad hidrogeológica no están totalmente establecidas en la bibliografía, sino que son conceptos que se dan

por sobreentendidos, pero que cada cual los define o interpreta de manera ligeramente diferente.

Podemos definir **formaciones hidrogeológicas** como aquellas formaciones litológicas que presentan, por sus características, la capacidad acuífera, es decir, circulación y almacenamiento de aguas subterráneas.

Se define un **acuífero** como la formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad. Según *Custodio y Llamas*, se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades.

Se define **unidad hidrogeológica** como una área geológicamente homogénea y que su comportamiento hidrogeológico es más o menos independiente de las zonas adyacentes. Están formadas por uno o varios acuíferos, agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua.

En El Salvador existen unos primeros intentos de realizar el mapa hidrogeológico nacional, pero de momento se ha empezado por la zona del occidente. Una vez realizado el mapa, el país quedará dividido en varia unidades hidrogeológicas. Esto servirá, en principio, para una buena gestión del recurso hídrico en El Salvador.

7.1.1. Formaciones hidrogeológicas de la zona

Basándonos en la geología de superficie, debido a que en la zona no existen pozos perforados de gran profundidad ni estudios realizados anteriormente sobre la geología del subsuelo, distinguimos tres formaciones (ver capítulo de litología. También ver mapa de zonas de balance hídrico en Anexo 1.

- **Rocas extrusivas en forma de colada de lava de composición basáltico-andesítica**, con aglomerados továceos altamente alterados. Son materiales terciarios de edad pliocénica (5 Ma a 1.64 Ma) y miocénica (23.8 Ma a 5 Ma). Las lavas se pueden encontrar en forma masiva, en estructura laminar diaclasada y meteorizada en forma de bolos. Las tobas y aglomerados terciarios de edad miocénica están fundidas englobando materiales como piedra, cenizas y bloques en una matriz de ceniza o polvo volcánico. La fuente de estos depósitos volcánicos y

piroclásticos asociados es probablemente los cerros el Monito y el Chino. Estos materiales se encuentran en toda la zona montañosa de Jucuarán. Ocupa la mayor parte del municipio (aproximadamente un 80%). Está definida como formación Bálsamo. Hidrogeológicamente, la permeabilidad de los basaltos disminuye normalmente con la edad a causa del metamorfismo, y se pierde la porosidad primaria por la deposición de minerales secundarios en los intersticios. La porosidad es extremadamente reducida y el flujo de agua subterránea solo existe en las fracturas. Por tanto, la presencia de fallas y fracturas juega un papel muy importante en la entrada y salida de agua, y en su almacenamiento. El espesor de esta formación, según bibliografía, puede ser de 500 a 1000 m. En los estudios realizados en varias partes del país, estos materiales son considerados casi impermeables (conforman límites y basamento de los acuíferos). Según bibliografía la permeabilidad de estos materiales es de 10^{-8} a 10^{-4} m/s.

Fotografía 7.1.- Basalto en lajas. Se observa fracturación.

Fotografía 7.2.- Basalto masivo fracturado

Fotografía 7.3.- Depósito de flujo piroclástico. Tobas.

Fotografía 7.4.- Basalto alterado a disyunción bolar.

- en las partes media y baja de las quebradas más importantes (de este a oeste: Qda. La Bocanita, Qda. El Mono, Qda. Seca, Río El Amatillo, Río La Ringlera, Río El Convento) los materiales predominantes son **depósitos cuaternarios** formados por sedimentos aluviales, coluviales y eluviales retrabajados. Son de estructura suelta. Constituyen un pequeño % del área estudiada (aproximadamente un 10 %), pero

hidrogeológicamente tienen un papel importante en el municipio ya que son zonas con una permeabilidad primaria media-alta y una porosidad eficaz media-alta. Puede formar acuíferos detríticos de buena productividad, pero de pequeña extensión.

Fotografía 7.5.- Depósitos aluviales en quebrada.

Fotografía 7.6.-Abanico aluvial cubierto por vegetación.

Fotografía 7.7.- Depósitos aluviales.

Fotografía 7.8.- Depósitos aluviales.

- materiales de **barra de playa y de manglar** en las partes más bajas del municipio, a partir de la cota topográfica inferior a 10 m. Es una formación moderna formada por sedimentos de playa, compuestos de abanicos aluviales y arenas depositadas por los ríos a lo largo de la línea litoral, y retrabajados por la acción del mar.

Fot

Fotografía 7.11.- Esteros y manglar

Fotografía 7.12.-Esteros y manglar.

7.2. Inventario de puntos de agua

Se ha realizado un inventario de puntos de agua de toda la cuenca SW del municipio de Jucuarán con el objetivo de realizar un mapa piezométrico, y saber el estado de los nacimientos y los pozos. Esto servirá para la gestión del agua en la cuenca. En este apartado se han generado los siguientes mapas que se pueden ver en el Anexo1: situación de pozos y manantiales, mapa de isopiezas y mapa de zonas de puntos de agua.

Todos los puntos utilizados en este trabajo se obtuvieron en una campaña de toma de datos, que tuvo lugar en el período comprendido entre los meses de junio y julio de 2003. En total se visitaron 138 puntos de agua:

- 71 nacimientos
- 65 pozos excavados
- 2 pozos perforados

En el Anexo 2 se presentan las fichas de cada uno de estos puntos. En ellas se indica el número de inventario de cada uno, con sus datos de referencia geográfica y fecha de medición. También se anexan los mapas de situación de los pozos y nacimientos.

La mayoría de los nacimientos se ubican en las quebradas de la zona montañosa de Jucuarán. Los pozos se encuentran en las quebradas o cerca de ellas, en las zonas más llanas formadas por depósitos aluviales y de playa.

7.2.1. Piezometría

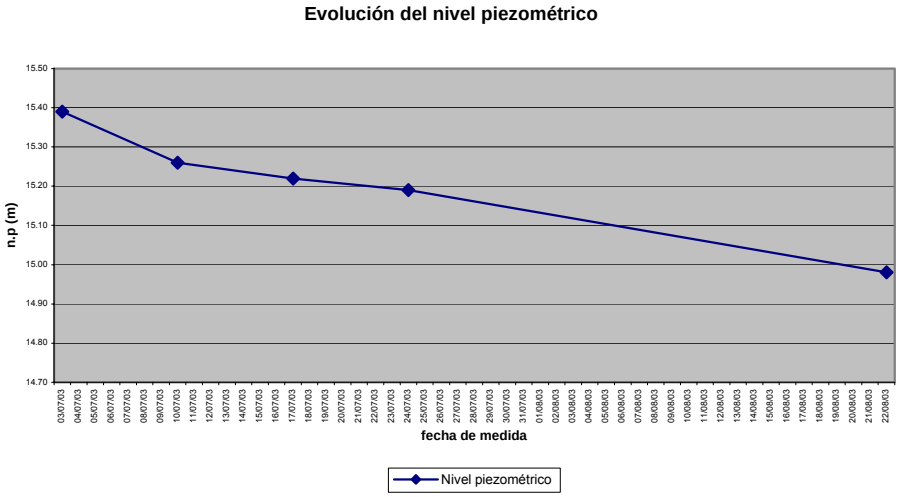
La realización de la piezometría tiene como finalidad establecer la dirección del flujo de agua subterránea y las divisorias de agua, para posteriormente realizar un balance hídrico en la cuenca.

Para obtener los valores de los niveles piezométricos en los pozos, se realizaron medidas directas en pozos y manantiales, y se situaron los puntos de medida en los mapas topográficos 1:25.000, de los que se obtuvieron las altitudes. En los nacimientos también se siguió el mismo procedimiento (en éstos, el nivel piezométrico coincide con la cota topográfica).

Fotografía 7.13.-Pozo 62. Se observa la cercanía al mar.

Los pozos excavados tienen profundidades desde 16 metros el más profundo, hasta 2.5 metros el más somero. Los de la **zona del Espino y Arcos del Espino** tienen profundidades que van desde 2.5 a 4 metros, y el agua se encuentra entre 1.5 y 2.5 m. de la superficie del terreno. En estos puntos no se ha podido establecer cual es la cota topográfica, ya que están entre la curva de nivel 10 y cero. Pero se observa que algunos de ellos tienen profundidades por debajo o igual al nivel del mar. Aún así, en general, el agua no es salobre. Si se profundizaran más encontraríamos agua salada. Todos estos puntos explotan un acuífero muy superficial ubicado en las arenas de playa, recargadas por el agua de lluvia. Cuando vacían el pozo tarda una hora en recuperarse otra vez. Acostumbran a tomar el agua de estos pozos para beber cuando no les llega agua del nacimiento de Puerto Caballo, pero en general solo se usan para lavar. El nivel de agua baja un poco en verano.

Los pozos de la **zona de Puerto Caballo, Concepción y la bocana** tienen profundidades desde 10 a 4 metros, y el agua está entre 2 y 7.5 m. de la superficie del



terreno. También están explotando un acuífero superficial ubicado en los depósitos aluviales de las quebradas. La columna litológica de la mayoría de estos pozos es: arcilla, arena y grava en la parte superior, talpetate más o menos duro, con algunos bolos, y talpetate más duro en el fondo (talpetate menos alterado). En verano disminuyen los niveles de agua. Éstos tienen una respuesta bastante rápida a la precipitación, indicando que explotan un acuífero somero que se recarga con el agua de lluvia principalmente. Muchos de los pozos son demasiado poco profundos y llegan a secarse en verano. Si se profundizaran podrían dar más agua.

Los dos pozos perforados están ubicados en la misma zona. En el pozo de la planta solar se midieron los niveles piezométricos en distintos días para poder ver la evolución y correlacionarlo con la precipitación. Se puede observar en el gráfico adjunto una disminución del nivel de 0.41 m. en casi dos meses. Esto coincide con una disminución de la precipitación en estos meses (el mes de Junio llovió bastante comparado con los meses de Julio y Agosto. De hecho este año ha sido bastante seco. Ver apartado de hidrología, tablas de precipitación), cosa que corrobora la idea que el acuífero tiene una respuesta rápida a la precipitación, y que ésta es la fuente de recarga.

Sería necesario realizar mediciones del pozo durante todo el año comprándolo con la precipitación de la zona par poder evaluarlo mejor.

Fig.7.1. Evolución del nivel piezométrico

En la **zona alta del municipio** no se encuentran pozos perforados, sino que solo existen manantiales. Esto se debe seguramente, a la dificultad de excavar pozos debido a la geología (rocas muy duras). Además no existe agua en todo el terreno, es decir, no es un acuífero continuo, sino que solo se encuentra en las zonas de fracturación. En el capítulo de modelo conceptual se comentan más a detalle los nacimientos.

Fotografía 7.14.- Pozo de la planta solar, Concepción.

7.2.1.1. Mapa de isopiezas

Se han trazado las isopiezas para determinar la dirección del flujo de agua subterránea y definir las divisorias (ver Anexo 1, mapa piezométrico). Referente a la zona de Arcos del Espino y el Espino, ésta se considera como un acuífero aislado del resto, constituido por arenas de playa. El acuífero correspondiente al resto del territorio estudiado presenta doble permeabilidad: por fisuración en los basaltos en lajas y en tobas compactas,

y por porosidad intergranular en los materiales más alterados y arenas (permeabilidad baja, por gran presencia de arcillas de alteración). Si se tratara de un acuífero profundo, la divisoria de aguas subterráneas, probablemente no coincidiría con la de aguas superficiales, pero como se puede observar, existe una buena correspondencia entre las dos. Esto significa que estamos tratando con un acuífero muy superficial. Podemos definir varias divisorias de agua subterránea a partir de la piezometría, y así diferenciar cuatro direcciones de flujo en la zona:

- Flujo desde la divisoria de aguas hacia el este (dirección Chirilagua).
- Flujo hacia la vertiente norte (hacia el Río Grande de San Miguel).
- Flujo hacia el oeste (dirección a los Esteros).
- Flujo hacia el sur, dirección al mar

Realmente, podríamos establecer que solo existen tres direcciones de flujo (hacia Norte, este y sur-suroeste), ya que para definir el acuífero entero tendríamos que ampliar la piezometría hasta la desembocadura del Río Grande de San Miguel, y éste correspondería a un límite de nivel constante del acuífero. Esto sobrepasaba el alcance del trabajo, por este motivo, en el oeste, se considera una divisoria de aguas superficial como límite. En el N-NW, se ha definido una divisoria de aguas subterránea a partir de la piezometría, diferenciando el flujo de agua que va directamente hacia el mar (dirección sur) del que fluye hacia la zona de los esteros (aunque esta divisoria no se tendrá en cuenta en el balance hídrico).

Las isopiezas se han dibujado con una equidistancia de 10 m. hasta llegar a la de 100 m. A partir de ésta, se han trazado cada 50 m. para facilitar el dibujo (es importante tener en cuenta este salto de niveles para interpretar el mapa). Se observa como las isopiezas, en la vertiente hacia la planicie costera, reflejan una disminución del gradiente hidráulico entre la zona montañosa más elevada, con valores de 0.35, y la zona cercana a la planicie, con valores de 0.03. Esta disminución coincide con la pendiente topográfica (debido a que se trata con un acuífero superficial). En la planicie costera y manglar el gradiente va desde 0.01 al este, a 0.003 en el oeste. En la zona de Puerto caballo se identifica un entrante bastante pronunciado de la piezometría. Esto podría deberse a que fuera vía preferencial para el flujo de agua, por contraste de permeabilidad con los materiales circundantes, pero no se tiene suficiente información hidrogeológica para corroborarlo. También puede producirse por un exceso de bombeo debido a la gran cantidad de pozos que hay en la zona, pero en realidad su extracción no es muy grande. Además, hacia el norte persiste este entrante, y allí no existen pozos, solo nacimientos.

7.2.2. Integración de información sobre los puntos de agua

En este apartado se ha intentado realizar una recopilación de toda la información obtenida de las visitas en campo de los nacimientos y los pozos, agrupándolos por zonas y características similares en cuanto a la geología de superficie. En el Anexo 1 se presenta el mapa con las distintas zonas marcadas.

Zona 1: Jutal, Jutalito, Colorado

Solo hay nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: 52, 53, 54, 65, 66 (puntos de campo 97, 98, 99, 120, 121). Geología general: basalto fracturado-meteorizado. Según el mapa litológico realizado en este trabajo se observa basalto-andesita en bolos. Nace bastante agua del basalto normalmente, aunque en el punto 97 parece que nazca de la toba (al estar tan alterado no se distingue bien el material). Los puntos 97 y 99 parecen especialmente buenos en cantidad de agua (el agua sale del contacto entre el basalto y la toba). El caudal del punto 99 es de 0.09 l/s y 0.18 l/s (es un caudal considerable teniendo en cuenta que podría abastecer a 150 personas al día según el caudal que se estima que utiliza un habitante de las comunidades por día, que es de 50 l/hab/día). Según el mapa geológico alemán en esta zona afloran epiclastitas efusivas, piroclastitas y lavas andesíticas-basálticas.

Zona 2: Zapote, Gualora, Gualorita

Nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 (puntos de campo 61, 62, 63, 64, 65, 66 y 67). Geología general: basalto en lajas fracturado. El agua sale de las fracturas del basalto. Sobretodo el punto 61 parece ser muy bueno, y la gente del pueblo ya lo ha limpiado para que nazca más agua (otras organizaciones ya han considerado este punto como bueno para hacer una captación para abastecimiento). Los caudales que se le ha medido son: 1,02 l/s y 0.78 l/s. El punto 64 tiene un caudal de 0.95 l/s, el punto 65 da 0.6 l/s y el 62 da 0.26 l/s.

Zona 3: Amate, Zapote

Nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: 27, 28, 31 (puntos de campo 68, 69, 72). Geología general: basalto muy alterado a arcilla. El agua emana de las paredes y del suelo. El caudal del punto 72 es de 0.05 l/s.

Zona 4: El Potrero, El Coyol, El Llano, Valle Seco, Samuria y Las Flores

Nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: 18, 19, 32, 33, 49, 50, 51, 13, 68, 69, 70, 71 (puntos de campo 40, 41, 73, 74, 94, 95, 96, 14, 132, 133, 134, 135). Geología general: Basalto duro en lajas. Por donde nace el agua el basalto está muy alterado a arcilla roja. En muchos puntos se observa un buen contacto entre el basalto duro fracturado y el meteorizado. El punto 40 (El Since) es una planta de bombeo de ANDA, y su caudal en época seca es de 5 l/s (buen caudal). El punto 41 tiene un caudal de 0.1 l/s, pero si este punto se limpiara un poco parece que pueda salir más agua. El punto 73 tiene un caudal de 0.07 l/s. Los puntos 95 y 96 abastecen a Samuria y Las Flores (caudal de este último es de 1 l/s o más). Son dos puntos que dan bastante agua. El punto 133 abastece a Valle Seco y Planón. En general es una zona de basalto fracturado que da bastante cantidad de agua, y por tanto se debe tener en cuenta para la exploración hidrogeológica.

Zona 5: La Bocana, El Jícaro

Nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: 56, 57, 58, 62, 67 (puntos de campo 103, 104, 105, 109 y 123). Geología general: basalto alterado con disyunción en bolos. Alternancia de basalto en bolos y en lajas. Zona de fracturación.

Zona 6: Quebracho, Jícaro

Nacimientos, excepto el punto 102 (pozo). Los puntos de agua de las fichas son: 55, 60 (pozo), 59, 60, 63 (puntos de campo 101, 102, 106, 107, 110). Geología general: basalto duro en lajas, fracturado. El agua emana de las fracturas. Hacia arriba el basalto se altera en bolos hasta convertirse en suelo superficial. El punto 106 tiene un caudal de 0.02 l/s.

Zona 7: El Jícaro

Nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: 61, 64 (puntos de campo 108, 111). Geología general: basalto alterado a bolos y arcilla. También hay basalto en lajas, pero no en el punto donde sale el agua.

Zona 8: Puerto Caballo

Nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: 38, 39, 40, 41, 42 (puntso de campo 78, 79, 80, 81, 82). Geología general: Alternancia de toba y basalto-andesita, y aluviones. El agua sale de basalto muy alterado a arcilla. Como estos puntos quedan en la quebrada y el resto de la zona es bastante llana, no se puede observar bien la geología. Estos puntos abastecen al Espino y a Arcos del Espino, sobretodo el punto 80.

Zona 9: Puerto Caballo

Pozos y nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: del 35 al 37 (nacimientos, puntos de campo del 24 al 40) y del 24 al 40 (pozos, puntos de campo del 75 al77). Geología general: En el mapa litológico corresponde a zona de aluviones. Los nacimientos parecen brotar del basalto en lajas. En los pozos la información corresponde a talpetate duro. Siempre hay agua aunque baja en verano.

Zona 10: El mono, Puerto Caballo

Nacimientos. Los puntos de agua de las fichas son: 46, 47, 48, 7, 8, 16, 6, 44, 45 (puntos de campo 136, 137, 138, 37, 38, 19, 6, 130, 131). Geología general: basalto fracturado duro. El agua sale de las fracturas que no están rellenas. En los puntos 130 y 131 la geología corresponde más a basalto en bolos, y el agua sale del fondo de la quebrada. El caudal del punto 136 es de 0.007 l/s, el 37 de 0.04 l/s (basalto muy fracturado) y el 38 de 0.035 l/s.

Zona 11: Salamar y concepción

Nacimientos. Los puntos de agua de las fichas: 2, 5, 9, 14, 15, 10 (puntos de campo 2, 5, 7, 16, 18, 100). Geología general: toba-talpetate. En el litológico la mayor parte se encuentran en material aluvional. El punot18 tiene un caudal de 0.009 l/s.

Zona 12: El Espino, Arcos del Espino

Pozos poco profundos (<5m), con una lámina de agua dulce de aproximadamente 1 m. Solo los puntos 7, 14 y 15 (de campo 20, 27 y 28) tienen agua un poco salobre. Se encuentran en material de playa-arena.

7.3. Hidrogeoquímica

El objetivo de este estudio es la caracterización y justificación de los posibles orígenes de las aguas: zonas de recarga, reacciones modificadoras, materiales por los que circulan, relación con el sistema de flujo e intrusión marina. También se ha procurado determinar la calidad físico-química y bacteriológica, y su potabilidad. Se presentan los mapas de alcalinidad, dureza, isocloruros, isoconductividades y pH. Está pendiente la instalación de un laboratorio de aguas contemplado en APS. Una vez creado se podrán realizar los análisis completos de las muestras. Los mapas y gráficos presentados se

encuentran en el Anexo 3 (resultados de los análisis químicos, gráficos de Pipper y Schoeller, mapa de cloruros, de conductividad eléctrica, de pH, de dureza, bicarbonato y alcalinidad, y gráficos de los elementos analizados).

7.3.1. Toma de muestras y datos

Se ha contado con un total de 43 análisis químicos (en el Anexo 3 se presentan los resultados):

- 17 muestra analizadas entre los años 2000 y 2001 por PROMESA en el estudio "*Reconocimiento de la calidad de agua de bebida en las comunidades de la zona sur del municipio de Jucuarán*".
- 26 muestras analizadas en campo en una campaña realizada entre los días 11 y 26 de agosto del 2003. De éstas, 11 son nacimientos, 13 son pozos, una corresponde a análisis del río las Flores y otra corresponde a la zona de Manglar.
- Un análisis de agua de lluvia recogida en la Ringlera. Al estar lloviendo muy poco los últimos meses, se trata de lluvia acumulada de varios días. De ésta, solo se ha analizado el pH, los cloruros y la dureza.

7.3.2. Interpretación de los diagramas de Pipper y Schoeller

Para este estudio se representan los datos en diagramas de Pipper y Shoeller, para dos grupos de muestras: las 17 analizadas en el 2001 y las 24 actuales (no se ha incluido la muestra del manglar ni la del río Las Flores). En el Anexo 3 se encuentran representados los gráficos.

7.3.2.1. Diagrama de Pipper para muestras del 2001

El diagrama de Pipper es triangular. Para saber el contenido en un elemento de un punto situado en el centro del diagrama, se traza una paralela al lado opuesto del vértice del elemento del que se quiere saber la cantidad. Los valores se representan en meq/l. Se usan dos diagramas separados para representar los aniones y los cationes. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas.

En el diagrama podemos observar en % las relaciones de los distintos elementos en cada una de las muestras. Aquí se expresan los valores en 5 de las muestras:

Muestra	Ca	Mg	Na+K	HCO_3	Cl	SO_4
A1	55	20	25	58	35	7
A2	0	50	50	75	22	30
A6	9	49	42	57	35	8
A8	39	8	53	37	20	43
A13	65	15	20	80	19	1

Tabla.7.1-Relaciones de los distintos elementos en cada muestra en %

La mayor parte de las muestras quedan agrupadas, y tienen una facies bicarbonatada cálcica, con contenidos apreciables en cloruros. Las aguas relacionadas con terrenos basálticos pueden contener valores un poco altos en sales, por la fácil alterabilidad de los minerales constituyentes. Además, la mayoría de Na, Ca y Mg pueden pasar al agua, mientras que el Fe y K son precipitados. Los procesos de disolución son favorecidos por el pH bajo que presentan las aguas.

La muestra A8 (La Ringlera) se aleja bastante de la composición general del resto de puntos, correspondiendo a una facies clorurada sódica con contenidos en sulfatos. De todas maneras, se trata de un agua de bombeo del río, y por tanto, la descartamos como punto de agua subterránea. Además, la muestra fue obtenida en período de lluvias, es decir, se trata de agua superficial de precipitación.

La muestra A6 también se aleja del resto, y corresponde a una facies clorurada sódica y bicarbonatada magnésica. Esta composición refleja la importante incorporación de sales marinas por su proximidad al mar (zona del Espino).

7.3.2.2. Diagrama de Schoeller-Berkaloff para muestras 2001

Se trata de un diagrama logarítmico, donde las columnas son todas escalas logarítmicas del mismo módulo.

Observamos que las muestras obtenidas corresponden, como se ha insistido, a facies bicarbonatadas cálcicas con contenidos apreciables en cloruros.

7.3.2.3. Conclusión de los resultados de las muestras del 2001

De los diagramas se deduce que se trata de aguas, en general, geoquímicamente similares, y por tanto tienen un origen y unos procesos en su recorrido, similares.

Aunque falta analizar el agua de lluvia de la zona (solo se cuenta con un análisis que no es representativo), seguramente se trata de aguas jóvenes, y tienen como origen la infiltración de la lluvia. El tiempo de residencia es corto y por tanto no existe el tiempo necesario para que se disuelva la matriz del acuífero.

Además, observando la figura siguiente (*Custodio & Llamas. Hidrología subterránea*) se puede ver que todas las aguas caen dentro de la zona representativa de las aguas potables (tanto en el diagrama de cationes como en el de aniones). Solo las muestras A2 y A6 estarían fuera de esta zona.

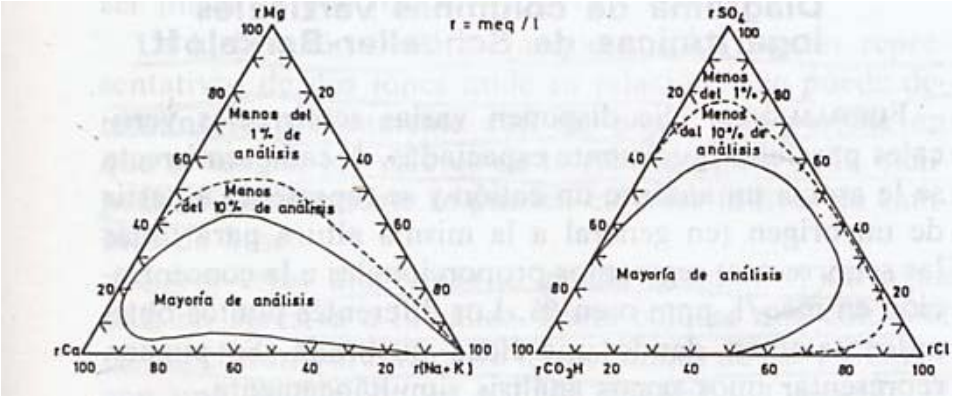


Fig.7.2.-Campos más probables de situación de los puntos representativos de las aguas potables (Modificado de Davis y de Wiest, 1966)

7.3.2.4. Diagrama de Schoeller-Berkaloff para análisis del 2003

Con los elementos analizados, e igual que en los análisis del 2001, se distinguen los dos tipos de facies bicarbonatadas, pero unas son magnésicas y las otras cálcicas, y existe otro grupo de muestras que tienen valores intermedios similares de calcio y magnesio.

Las facies bicarbonatadas magnésicas corresponden a la zona del Espino y Arcos del Espino. Además tienen altos contenidos en cloruros y una conductividad eléctrica elevada. Esto evidencia su proximidad al mar, y por tanto tienen una clara influencia del agua salina. Tener en cuenta que estos puntos están rodeados de agua de mar, ya que por su lado norte tienen el Estero del Espino. Las muestras que se corresponden a estas facies son la 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 (aunque en la 8 y la 9 no se tiene el valor de calcio y magnesio, cabe esperar la misma tendencia, sobretodo en el 8 que es un pozo salinizado).

Las muestras 15, 16 y 17 tienen una facies bicarbonatada cálcico-magnésica, debido a que también están cercanas al mar, en una zona topográficamente baja, donde puede que exista una mezcla entre el agua que proviene de la zona montañosa y el agua de mar y manglar.

El resto de los puntos corresponden a facies bicarbonatadas cálcicas. Estas muestras son de nacimientos, y son características de toda la zona montañosa de Jucuarán. Como se ha insistido anteriormente, seguramente se trata de aguas jóvenes, con poco tiempo de tránsito por los materiales acuíferos y por tanto, con poca disolución de los elementos que constituyen estas rocas.

7.3.2.5. Diagrama Pipper en muestras del 2003

El diagrama de Pipper donde están representados los elementos no es muy significativo, ya que faltan los iones Na y K, y también el SO_4 cuyo valor obtenido no es muy fiable. De todas maneras la muestra A8 y A5 se alejan de las otras considerablemente en su más alto contenido en cloruros y en magnesio que el resto de las muestras.

7.3.3. Interpretación de los mapas y gráficos

7.3.3.1. Cloruros y conductividad eléctrica

Los análisis de cloruros se realizaron en campo con el método de la colorimetría y los de conductividad eléctrica mediante un conductivímetro, cuya resolución es de 100 µS/cm, por tanto, no se pueden apreciar pequeños cambios. (ver gráficos y mapas en Anexo 3 y 1 respectivamente).

Analizando los gráficos se observa una buena correlación entre ambos, como era de esperar. Los pozos situados en la costa presentan los valores más altos, en especial el 5 (José Ofilio), el 6 (Ana Maria del Cid) y el 8 (Santiago Orellana), con concentraciones en cloruros superiores a los valores característicos de aguas dulces (10-250 ppm). Esto comunica al agua un sabor salado. En especial el pozo 8 tiene un valor muy alto, de 1148 ppm en cloruros y una conductividad eléctrica de 3800 µS/cm, debido a su cercanía al entrante de agua marina que forma el estero del Espino.

En el mapa de isoconductividades e isocloruros se observa que no existe una cuña de agua de mar que penetre en el continente, sino que las isolíneas se sitúan paralelas a la línea de costa, indicando que no se produce intrusión marina. Los valores altos en pozos del Espino y Arcos del Espino se deben simplemente a su cercanía al agua de mar. Pero la mayoría de pozos de esta “isla” tienen valores correspondientes a agua dulce.

Esto se da porque los sedimentos detrítico-arenosos de la zona, constituyen un pequeño acuífero (más bien una bolsa de agua dulce) capaz de acumular agua de lluvia durante el invierno. Como los pozos no son explotados con bomba, y simplemente el agua se saca con cubos cuando es necesaria (mínima extracción), el agua acumulada en este

reservorio no se agota, y la interfaz agua dulce-salada se mantiene estable, probablemente vertical y paralela a la línea de costa, casi entrando en el mar.

En la zona montañosa de la cuenca los valores están entre 100 y 200 µS/cm y entre 20 y 30 ppm de Cloruros. En el mapa de isoconductividades se observa una mayor CE hacia el oeste, debido, probablemente a la cercanía al manglar (agua salina). De todas formas se necesitaría un estudio más detallado de la relación entre el manglar y estos puntos de agua para verificar que realmente existe una influencia, y no se trata de simples procesos de disolución o aportes de sales por procesos antropogénicos. Estos valores son característicos de aguas muy dulces parecidas a las aguas de lluvia.

El valor conveniente de cloruros para la potabilidad del agua según la OMS es de 200 ppm, aunque se admite hasta 600 ppm, y según la norma salvadoreña es de 250 ppm. Por tanto, a excepción de los puntos cercanos a mar, todo el resto de pozos y nacimientos de la zona están dentro de los límites convenientes.

7.3.3.2. pH

Se analizó en campo con el método de la colorimetría. Se observa que los puntos de agua pertenecientes al Espino y Arcos del Espino tienen un pH entre 7.5 y 8 UpH. Son aguas básicas debido a su cercanía al mar (el valor característico de agua de mar es 8 UpH). El resto de puntos de agua del territorio tienen un pH entre 6 y 6.5 UpH. Son aguas ácidas y por tanto agresivas. Su pH es parecido al del agua de lluvia (6-6.5), cosa que confirma que la circulación de las aguas subterráneas por la formación geológica es rápida, con poco tiempo de contacto entre agua y roca, y por tanto el agua subterránea tiene las mismas características que la de recarga. De todas formas, las rocas de la formación geológica son intermedias-ácidas, y también pueden contribuir a la acidez del agua. En el Anexo 1 se puede ver el mapa con la distribución de los pH y un gráfico con los valores de los distintos puntos muestreados en el Anexo 3.

Los valores convenientes según la OMS son de 7 a 8.5 UpH y según la norma salvadoreña son de 6.5 a 8.5. Pueden considerarse aguas al límite de su potabilidad.

7.3.3.3. Bicarbonato y alcalinidad

Al tratarse de aguas con un pH<8.5, se tiene que el HCO_3^- (ppm) = 1.22 TAC (ppm de $CaCO_3$). Por este motivo los gráficos de los dos análisis siguen la misma tendencia. Los valores usuales de alcalinidad TAC están entre 100 y 300 ppm pudiendo estar entre 50 y 500 ppm. El agua de mar tiene 100 ppm. En general se

trata de aguas con una alcalinidad dentro de los valores usuales, pero un poco elevada. Ver mapa y gráficos en el Anexo 1 y 3 respectivamente.

7.3.3.4. Gases disueltos. Anhídrido Carbónico y Oxígeno disuelto

Los valores usuales de CO_2 son entre 1 y 30 ppm, correspondiendo los valores más bajos a aguas en contacto fácil con la atmósfera. En acuíferos profundos en los que existe aporte de CO_2 (materia orgánica, aportes volcánicos...) y elevadas presiones, pueden existir aguas con contenidos en CO_2 de hasta 1500 ppm (*Custodio y Llamas, 1996*). En la zona estudiada, los pozos pertenecientes al Espino y Arcos del Espino tienen una concentración de CO_2 más baja con respecto a los pozos y nacimientos del resto del territorio. En todo caso, las aguas de la zona montañosa circulan por rocas volcánicas donde pueden existir algunas emanaciones de este gas.

El oxígeno disuelto presenta valores entre 3 y 7 ppm. En principio las aguas subterráneas suelen tener valores de 0 a 5 ppm, y en muchos casos por debajo de las 2 ppm. Los análisis realizados en el estudio entran en estos rangos, teniendo en cuenta que como el análisis se ha realizado en campo, se han podido cometer errores de medida al no disponer del recipiente adecuado para tomar la muestra. Ver gráficos en el Anexo 3.

7.3.3.5. Dureza. Calcio y Magnesio

La dureza se ha analizado en campo. A partir de la dureza al calcio, se obtuvo la dureza al magnesio:

Dureza al Mg (ppm $CaCO_3$) = Dureza total – Dureza al Ca

También los valores de Ca y Mg se obtuvieron:

*Ca (ppm) = $CaCo_3$ (ppm) * 0.4*
*Mg (ppm) = $CaCo_3$ (ppm) * 0.243*

En los gráficos se observa que, en general, los pozos situados cerca del mar (Zona del Espino) presentan valores de Mg superiores al Ca, mientras que el resto de puntos presentan un valor de Ca bastante por encima del de Mg. Por tanto, y como ya se ha comentado en los diagramas de Pipper y Shoeller, existen dos tipos

de aguas diferenciadas en la zona: facies bicarbonatada magnésica y fácies bicarbonatada cálcica. En el Anexo 3 y 1, se encuentran los gráficos y mapas distribución de la dureza.

Según la norma salvadoreña, la dureza no puede sobrepasar los 400 ppm, cosa que solo ocurre en el pozo 8.

7.3.3.6. Nitratos y fosfatos

Los valores obtenidos son muy bajos, y en caso de ser fiables, quiere decir que no existe una contaminación por este tipo de elementos. Los nitratos suelen estar en concentraciones de 0.1 a 10 ppm, tal como se observa en las aguas de la zona. La concentración de las muestras de la zona es entre 0.5 a 2.5 ppm en nitratos.

7.3.4. Potabilidad del agua

La potabilidad del agua se determina en base a criterios químicos y bacteriológicos. Ambos criterios pueden ser excluyentes por separado, aunque los efectos sobre el hombre sean diferentes: casi inmediatos en aguas bacteriológicamente impotables, y diferidos en la químicamente no potables.

7.3.4.1. Características físico-químicas

En la siguiente tabla se muestran las características comparativas en reglamentaciones de aguas potables (valores en ppm):

	O.M.S (1)		España(2)		Norma salvadoreña(3)
Caracteres	**Conveniente**	**Admisible**	**Conveniente**	**Admisible**	
Arsénico (As)		0.2		0.2	
Bario (Ba)		1.00			
Cadmio (Cd)		0.01			
Calcio	75	200			
Carbón extraído con cloroformo (CCE)	0.2	0.5			
Cianuro (CN)		0.01		0.01	
Cloruros (Cl)	200	600	250	350	250
Cobre (Cu)	1.0	1.5		1.5	1
Color (pt-Co)	5	50	5	15	
Cromo (Cr +6)		0.05		0.05	
Detergentes (ABS)	0.5	1		ND	
DQO (O_2)			3	3	
Dureza ($CaCO_3$)					400
Fenoles	0.001	0.002		0.001	
Fluoruro (F)	0.5 a 1	1.5	1	1.5	1.5
Hierro (Fe)	0.3	1	0.2(Fe+Mn)	0.3(Fe+Mn)	0.3
Magnesio (Mg)	50	150	50	100	50
Manganeso (Mn)	0.1	0.5			0.1
Nitratos (NO_3)		45	30	30	45
Olor	Aceptable		Inodora	Inodora	
PH a 18°C	7-8.5	6.5-9.2	7-8.5	6.5-9.2	6-8.5
Plata (Ag)	0.05				
Plomo (Pb)		0.1		0.1	
Residuo seco	500	1500	750	1500	
Sabor	Aceptable				
Selenio		0.05			
Solidos Totales	500	1500			
Sulfatos (SO_4)	200	400			250
Turbidez (SiO_2)	5	25			1-5
Zinc (Zn)	5.0	15			

Tabla.7.2.-Características comparatives en reglamentaciones de agua potable. (1) O.M.S.- International Standards for drinking-water. Ginebra, 1963. (2) Código alimentario español, 1967.

De éstas, las sustancias químicas específicas que pueden afectar a la salud son los Floruros y los nitratos. Las sustancias tóxicas son el Plomo, Arsénico, Selenio, Cromo (hexavalente), Cianuro, Cadmio, Bario y Plata.

En la siguiente tabla se especifican los indicadores químicos de polución:

Indicador	Límite mínimo para considerar que hay contaminación (mg/l)
Demanda Química de oxígeno (DQO)	10
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	6
Nitrógeno Total (excluido NO_3^-)	1
NH_3	0.5
Carbono (extracto al cloroformo)	0.5
Grasas	1

Tabla. 7.3.-Indicadores químicos de polución. DQO: medida de las materias orgánicas oxidables presentes en el agua.DBO: medida de la cantidad de oxígeno necesaria para la reducción de la materia orgánica susceptible de tal transformación.

Observando los análisis realizados en el años 2000-2001 y los realizados en este estudio, se puede decir que las aguas son de buena calidad físico-química, en general, en lo que respecta a los parámetros analizados. Sólo en los pozos de José Ofilio (punto 5), Ana María del Cid (punto 6) y Santiago Orellana (punto 8) analizados en el año 2003, se sobrepasa los límites permitidos en cloruros, y en este último, la dureza total también supera los límites. Son pozos cercanos al mar y a la zona de manglar. También se ha comentado anteriormente que el pH de muchos de los pozos es bastante ácido, y en el límite o por encima de lo permitido. Además, en el pozo 8 se detectó nitritos, cosa que indica que se está dando una transformación de amoníaco a nitrato, y por tanto existe una probable contaminación por aguas residuales urbanas. En los análisis del 2001 se superan los valores de turbidez en los puntos 6, 8, 15, 16 y 17. En estos puntos el agua tendría que ser filtrada.

7.3.4.2. Características bacteriológicas

En la etapa de realización del proyecto no se han podido realizar análisis bacteriológicos, pero se dejan las referencias de los parámetros a tener en cuenta, ya que se proyectan realizar en el 2004.

Los criterios de calidad bacteriológica del agua se basan en la determinación de aquellos microorganismos que puedan afectar directamente a la salud del hombre o que, por su presencia, puedan señalar la posible existencia de otros (*Custodio y Llamas, 1976*).

En la normativa de la O.M.S., la determinación del grupo coliforme como indicador bacteriológico y el MPN (número más probable) para valorar su intensidad, responden a esas necesidades.

Para fijar los límites correspondientes al MPN en 100 ml., se distinguen dos casos, según que el agua problema haya sido tratada o no previamente.

a) en agua tratada no deberá encontrarse bacterias coliformes en el 90% de las muestras examinadas en un año o bien el MPN debe ser menor que 1. Simultáneamente ninguna muestra tendrá un MPN superior a 10, ni se sucederán muestras consecutivas con un MPN comprendido entre 8 y 10, en cuyo caso deberán analizarse un número mayor de ellas.
b) En aguas sin tratamiento, el MPN será menor de 10 en el 90% de las muestras examinadas en un año. Ninguna de ellas superará el índice de 20. Las bacterias coliformes fecales serán menos del 40% del número de microorganismos coliformes mostrados por el MPN. No se permite un MPN mayor de 15 en muestras consecutivas. Si aparece un MPN de 20 o mayor, debería estudiarse la posibilidad de un tratamiento correctivo.

En cuanto al cloro residual se recomienda que no exceda de 0.5 mg/l y no sobrepase 1 mg/l.

En este trabajo solo se cuenta con análisis realizados en el estudio del 2000-2001, muestreados en una fecha concreta, y por tanto no existe una sucesión de medidas de un mismo punto, para poder evaluar mejor la contaminación por coliformes. En todo caso, y con los análisis de que se dispone, puede decirse que la calidad bacteriológica de las aguas es mala, ya que los valores de coliformes totales (NMP/100 ml) son en general elevados, en algunos casos, excesivamente (puntos A4 de Puerto Caballo y A6, pozo artesanal del Espino. El valor de 15000 NMP/100 ml corresponde valores de aguas residuales). Solo en algunos bombeos es donde el valor de coliformes es cero, seguramente porque se trata de aguas desinfectadas con cloro. Los coliformes fecales en los pozos 6 y 8 superan el 40% de de los totales. Excepto en los puntos 4 y 6, puede solucionarse esta contaminación con procesos de desinfección con cloro.

Sería recomendable realizar algunos análisis bacteriológicos en algunos nacimientos y pozos que actualmente son usados para abastece distintas comunidades, para evaluar su posible contaminación y aplicar las medidas correctoras. A largo plazo, sería bueno poder analizar muestras anualmente para tener un control de la calidad del agua y su evolución.

7.3.5. Causas de contaminación de las aguas

1. Contaminación por actividades domésticas. Es una contaminación orgánica y biológica nacida en fosas sépticas, pozos negros, fugas en sistemas de alcantarillado, vertido indiscriminado de aguas de letrinas... El agua de los abastecimientos públicos utilizada para fines domésticos supone la evacuación prácticamente del mismo volumen, pero con sus características alteradas.
2. Las escombreras y vertederos de basura son focos de posible contaminación al arrastrar la lluvia en forma superficial o infiltrándose a través del suelo, ciertos elementos solubles que se incorporan a los recursos de agua existentes.
3. Los fertilizantes utilizados en la agricultura introducen, entre otros elementos, fósforo y nitrógeno, que favorecen la proliferación de algas en aguas superficiales (turbidez, olor, color y sabor desagradables). Además, los insecticidas, pesticidas y otros, pueden contaminar las aguas superficiales y subterráneas. Aún cuando no se utilicen abonos y pesticidas, la agricultura afecta a la calidad de las aguas subterráneas y de los ríos que las drenen por simple concentración de sales y por alteración de los procesos en el suelo, que pueden dar origen a una elevación del contenido en nitratos.

7.3.6. Productos químicos utilizados en la zona

Se ha determinado que en la zona de Jucuarán son utilizados los siguientes herbicidas, pesticidas y abonos, de los que se explica las consecuencias que tienen, sobre la salud humana y el medio ambiente. Comentar que la mayoría de estos productos son considerados altamente tóxicos en muchos países del mundo, sin embargo, son estos mismos quienes los venden.

- **Paraquad**. De este tipo se usa el Gramoxone. Herbicida dipiridilo. Pertenece a la docena maldita. Existe envenenamiento por ingestión, penetración cutánea, inhalación y absorción a través de heridas. Los efectos que produce en las personas son dolor de cabeza, temblores, diarreas, insuficiencia respiratoria, alta toxicidad aguda y efectos irreversibles en el pulmón y riñones. Provoca edema y fibrosis pulmonar. También afecta al sistema cardiovascular. El efecto producido en el medio ambiente es que es altamente persistente, y por esto se ha prohibido su uso en la agricultura en muchos países. Contamina las aguas subterráneas y es moderadamente tóxico para aves y peces.

- **Paration**. Insecticida organofosforado extremadamente tóxico. Pertenece a la docena maldita. Actúa por contacto, ingestión y penetración. Los efectos en las personas es que es inhibidor irreversible de la colinestreasa. Dificultades para hablar, bradicardia, pérdida de conciencia y de los reflejos normales hasta convulsiones y coma, parálisis respiratoria. El banco mundial recomienda no utilizarlo. La EPA señala que no hay margen de seguridad en su uso. Como efectos ambientales destacar que es peligroso para animales, tóxico para abejas, peces y aves, y efectos mutagénicos en plantas.

- **Metamidofos**. Pertenecen a este grupo el Monitor 600, el MTD 600 y el Tamaron 600. Insecticida y acaricida organofosforado. Efectos por contacto y sistémico. Puede ser fatal si se inhala o es absorbido a través de la piel. Efectos en el ambiente, provoca efectos residuales en aves. Tóxico para peces, abejas y otros animales silvestres. También causa la muerte de ganado que ingiere forraje en campos tratados.

- **2,4-D**. Herbicida fenoxiacético sistémico. Hedonal. Los efectos en personas son vómitos, diarrea, debilidad, sudoración, pérdida de visión, memoria y concentración, severa dermatitis. Tóxico para hígado y riñones. Irritante gastrointestinal. Como efectos ambientales es tóxico para peces, insectos, pájaros y vida silvestre en general, reduciendo su número y retardando la tasa de recuperación.

- **Organoclorado**. Aldrín. Pesticida que afecta al sistema nervioso. Se manifiesta con convulsiones, parestesia, agitación involuntaria, ataxia e hiperreflexia. Es posible que las convulsiones causen la muerte porque interfieren con el intercambio de gases

pulmonares y generan acidosis metabólica severa. Predispone a arritmias cardíacas.

Otros productos utilizados son: Lannate, Malatión, Volaton, Fulidol, Surcopug y Ranger como pesticidas, y Sulfato de amonio y Fórmula 16200 como abonos.

7.3.7. Fosas y vertederos

En el Anexo 3 (capítulo de residuos sólidos) se presenta una tabla con las fosas, letrinas y botaderos encontrados en la zona estudiada, y fichas de algunos de ellos. También se presenta un mapa con la situación de los botaderos con respecto a los puntos de agua inventariados. Existen cinco puntos principales de vertederos de residuos sólidos, uno de ellos clausurado recientemente (mes de septiembre de 2003):

- Samuria: es el botadero más grande del municipio. Ha sido clausurado recientemente. Se trataba de un vertedero incontrolado, pero permitido por la alcaldía. Ahora haría falta limpiarlo para recuperar la zona. La basura se tiraba a la quebrada las Flores, donde aguas abajo se encuentran los nacimientos de Samuria y las Flores, que abastecen a estas comunidades.
- Jucuarán: vertido de basura en la quebrada que pasa por el casco urbano. Esto da problemas a la colonia de Santa María.
- Arcos del Espino: vertido asociado a los deshechos de los restaurantes cercanos.
- Los Conventos: Vertido de basura en la quebrada. Se asocia a los deshechos producidos por la escuela.
- Jucuarán. Vertido en la zona del Almendro, a la quebrada del Jutal. Este punto hace muchos años que sirve de botadero (más de 30 seguro), y es donde actualmente también se tira la basura que anteriormente se vertía en el de Samuria. Esta quebrada desagua al Río Grande de San Miguel y laguna del Jocotal, y afectaría a estas zonas.

Todos estos puntos de vertido pueden ocasionar contaminación de las aguas superficiales (en épocas de lluvia, con arrastre de residuos) y subterráneas por filtraciones de los lixiviados producidos. Por tanto, todos los puntos se deberían clausurar y limpiar puntos, y establecer una zona adecuadamente diseñada para tal uso. En el capítulo de residuos sólidos se encuentra más información sobre este tema.

Respecto a las fosas, algunas comunidades utilizan letrinas aboneras, pero en muchas casas siguen utilizando letrina de fosas, cosa que provoca contaminaciones del manto freático. Algunas comunidades que tienen letrina abonera no la utilizan por escrúpulos. Se aconseja que se construyan letrinas aboneras en todas las casas, se informe a la población sobre el beneficio de éstas y se abandone el uso de fosas.

7.3.8. Protección de acuíferos y captacione

Al ser muy difícil la regeneración de un acuífero contaminado, las medidas de anticontaminación deben ser preferentemente protectoras. Esto es especialmente importante en acuíferos y captaciones para abastecimiento público, para evitar que los contaminantes alcancen el agua extraída. En general, la educación ciudadana y un mejor conocimiento de las aguas subterráneas son importantes desde el punto de vista de la protección (*Custodio y Llamas, 1996*).

Áreas de protección

Consiste en definir una zona alrededor del pozo o nacimiento en la que se prohíban o limiten determinadas actividades. Estas áreas deben extenderse hasta la zona de recarga y han de tener en cuenta:

- Intensidad, régimen y localización de la recarga.
- Características, disposición y propiedades hidráulicas del terreno, y sus caracteres de autoprotección contra la contaminación.
- Controles naturales y artificiales existentes.
- Posición y variaciones de la superficie freática y niveles piezométricos.
- Límites en profundidad y laterales.
- Diferentes posibles causas de contaminación.

Por tanto es necesario tener un enorme conocimiento del acuífero para establecer estos perímetros, cosa muy difícil generalmente, e imposible en el estudio presente. De todas maneras, puede determinarse que no debería haber puntos de vertido de residuos sólidos, fosas o actividades relacionadas con la agricultura (abonos, pesticidas, herbicidas...) cerca de los nacimientos y pozos utilizados para abastecimiento de la zona, ni tampoco aguas arriba de las quebradas donde nace el agua, aunque el punto de contaminación esté lejos del nacimiento.

7.3.9. Conclusiones y recomendaciones

7.3.9.1. Conclusiones

- Las aguas de la zona estudiada presentan dos tipos de facies diferenciadas: bicarbonatada cálcica en la zona montañosa y bicarbonatada magnésica en la zona de la costa y cerca del manglar.

- Son aguas geoquímicamente similares. Tienen un origen y experimentan unos procesos similares en su recorrido por la formación geológica.
- Son aguas jóvenes que tienen como origen la infiltración de la lluvia.
- La mayoría de muestras analizadas y representadas en el diagrama de Pipper, están dentro de la zona representativa de las aguas potables.
- Los cloruros y la conductividad eléctrica es más elevada en algunos puntos cercanos al mar y manglar.
- No existe intrusión marina. Las isolíneas son paralelas a la línea de costa, debido a que hay una mínima extracción de agua, y por tanto la interfaz agua dulce-agua salada está en equilibrio.
- El pH de las aguas es algo ácido, pero de origen natural. Son agresivas. Los valores están en el límite de lo permitido por las reglamentaciones.
- No parece existir contaminación por nitratos ni fosfatos.
- Son aguas de buena calidad físico-química.
- Respecto a la calidad bacteriológica no se tienen análisis actuales, pero con los que se obtuvieron del estudio del 2000, se concluye que son de mala calidad en general.

7.3.9.2. Recomendaciones

- Realizar análisis de coliformes fecales y totales, nitritos o amonio, sólidos en suspensión, total de sólidos disueltos, turbidez, hierro, para determinar la calidad de las aguas subterráneas. Sería ideal poder hacerlos en todos los puntos en que se ha hecho el análisis físico-químico. En caso de solo poder hacer 3 análisis de este tipo se recomiendan en los puntos: El Since (nº de campo 40) por tener un caudal grande y abastecer a todo Jucuarán; Samuria-Las Flores (nº de campo 95 y 96) por dar un caudal elevado, abastecen a las dos comunidades y aguas arriba existe un botadero en la quebrada; pozo de José Ofilio (nº de campo 35) por estar entre puntos de vertido de basura.
- Realizar análisis actuales en las muestras analizadas de Na, SO_4, NO_3, K, NH_4, Ca, Mg, para una buena determinación hidrogeoquímica de las aguas.
- Clausurar y limpiar los puntos de vertido de basura del municipio.
- Construir letrinas aboneras en todas las casas, y abandonar el uso de fosas.
- Evitar el uso de productos químicos utilizados para el campo (herbicidas, pesticidas) que son peligrosos para la salud humana y para el medio ambiente, incluyendo las aguas subterráneas.
- Concienciar a la población de los efectos que pueden tener sobre la calidad del agua de bebida, el uso de las fosas, los puntos de vertidos sólidos incontrolados, el uso de ciertos productos para el campo.

7.4. Modelo conceptual del acuífero

El modelo conceptual consiste en definir cual es el funcionamiento del acuífero en cuanto a recarga, zona de transporte y descarga del agua subterránea.

7.4.1. Modelo conceptual

La variedad litológica de la zona, unida a una estructura compleja, por gran fracturación de los materiales que conforman las montañas de Jucuarán, implica gran dificultad en la interpretación de los flujos subterráneos. Globalmente, la zona estudiada no conforma un acuífero por sí solo, sino que forma parte del acuífero de Usulután, continuación oriental del acuífero Lempa-Usulután, definidos en el estudio "*Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central*" (*2001*). El acuífero Lempa-Usulután está formado por sedimentos costeros, piroclásticos cuaternarios y lavas de las laderas meridionales del macizo volcánico (volcán de Usulután). La mejor explotación está en la zona occidental, formada por las faldas sur-occidentales del macizo volcánico y por el delta del Río Lempa. Hacia el este (municipio de Jucuarán) la planicie se va estrechando y aumenta los limitantes de extracción de agua subterránea, sobretodo por el peligro de la intrusión salina. La continuación oriental del acuífero Lempa-Usulután corresponde al acuífero volcánico de Usulután. Los depósitos aluvionales de la planicie, al sur de Usulután, consisten en ciénagas y marismas, por lo que el acuífero efectivo está formado por piroclastos cuaternarios. Al este, el acuífero de Usulután está conectado con el aluvial de la cuenca del Jocotal.

En consecuencia, las montañas de Jucuarán constituyen un límite hidrogeológico de estos acuíferos, y podría considerarse que en esta zona se produce una recarga-descarga bastante local a través de las fracturas (diques, sill...) en estos materiales. La descarga se realiza mediante los múltiples manantiales de la zona. Según el grado de fracturación y la interconexión entre las fracturas, existen nacimientos con caudales superiores y más constantes que otros, que corresponden a la descarga de acuíferos "colgados" (acuíferos de muy pequeña extensión no conectados con otros, es decir, que forman una bolsa de agua, tal que solo puede ser recargada directamente con agua de precipitación.). Esta agua infiltrada en las montañas no llega a la zona de los esteros (o podría llegar, pero en poca cantidad), sino que mayoritariamente, es descargada antes de llegar a las zonas bajas. En las quebradas y zonas bajas, también existe una recarga local, que descarga a los manglares (ver figura del modelo conceptual). Más adelante se incluyen algunos comentarios sobre manantiales.

Por otro lado no contamos con suficientes sondeos que permitan apreciar, no solo la disposición estructural, sino también el nivel de agua (si existe) en profundidad.

El flujo regional (considerando el acuífero global) es en dirección sur, hacia el mar. Pero concretamente en la zona estudiada diferenciamos cuatro direcciones de flujo (ver Anexo 1, mapa isopiezas):

- Flujo desde la divisoria de agua superficial hacia el este.
- Flujo hacia la vertiente norte desde la divisoria de aguas superficial
- Flujo hacia el oeste
- Flujo hacia el sur, dirección al mar

Como ya se comentó en el capítulo de piezometría, realmente podríamos establecer que sólo existen tres direcciones de flujo (hacia norte, este y sur-suroeste), ya que para definir el acuífero, como mínimo tendríamos que ampliar la piezometría hasta la desembocadura del Río Grande San Miguel, y éste correspondería a un límite de nivel constante del acuífero. Esto sobrepasaba el alcance del trabajo, por este motivo, en el oeste, se considera una divisoria de aguas superficial como límite. Por el norte se ha definido una divisoria de aguas subterránea a partir de la piezometría, diferenciando el flujo de agua que va directamente hacia el mar (dirección sur) del que fluye hacia la zona de los esteros (oeste).

Es difícil establecer una zona preferencial de recarga. En mayor o menor cantidad se produce recarga en todo el municipio. Sin embargo, la máxima precipitación es en los cerros (aunque no se tengan datos de precipitación, esto se ha observado durante todo el trabajo de campo en la zona), y es ahí donde recarga los niveles permeables que drenan los distintos manantiales de los que se abastece la población. En los depósitos cuaternarios de las quebradas es donde se produce una mayor recarga por precipitación, debido a la naturaleza de los materiales. La zona de transporte es local, y descarga rápidamente. La zona descarga principal, sería donde las aguas vierten a los esteros y manglar.

Se han diferenciado dos tipos fundamentales de acuíferos atendiendo a la permeabilidad:

- Acuífero figurado (zona de los cerros)
- Acuírfero poroso detrítico (zona de aluvión y barra del Espino)

Las características hidrogeológicas y geológicas de éstos, se han comentado en el apartado de formaciones hidrogeológicas (aunque se dispone de muy pocos datos sobre ellos).

7.4.2. Geología estructural. Importancia de las fallas

Las montañas de Jucuarán limitan en el norte con una zona de fallas de 11 km. de largo, con un sistema que va de este a oeste. El graben formado al norte de la zona montañosa pertenece a finales del Plioceno o principios del Pleistoceno (1.8 Ma).

Las fallas son importantes para el agua subterránea. La presencia o ausencia de fallas en los terrenos elevados, muchas veces es la única base para la localización de pozos de exploración para aguas en la roca madre. Esto es cierto donde la permeabilidad primaria es baja, y las fracturas, grietas, juntas y fisuras son pobremente desarrolladas o ausentes, tal como pasa en la zona estudiada de los cerros. Las fallas son zonas de dislocación y debilidad, y por eso, pueden producir permeabilidad secundaria. Algunas de ellas tienen de moderada a alta permeabilidad, y otras pueden ser de pequeña o baja permeabilidad. Pueden producir rocas brechificadas, y si no son cementadas posteriormente, forman un camino excelente para el movimiento del agua subterránea. Otras fallas más antiguas pueden haber tenido soluciones termales percolando hacia arriba a lo largo de las paredes, depositando minerales, que sellan eficientemente o cierran los espacios y poros entre los granos y fragmentos. Algunas fallas pueden triturar las paredes de la roca, produciendo una arcilla que actúa como sello o barrera y permite el estancamiento del agua subterránea. Las zonas permeables de las fallas en rocas consideradas impermeables como basaltos, andesitas, aglomerados cementados o tobas, deben ser consideradas en el desarrollo de recursos de agua subterráneas. Otras fallas, actúan como barreras para el movimiento de las aguas subterráneas, actuando de trampa para el agua, presionando ésta, hacia fracturas y otras aberturas secundarias, y forzándola a salir, a la superficie como fuentes.

Las montañas de Jucuarán están muy deformadas y fracturadas. La formación terciaria ha sufrido mucho fallamiento, que se manifiesta en el curso del drenaje de la zona y por las depresiones que han dado origen a pequeños valles o altiplanos, rellenos de sedimentos jóvenes. El sistema de fallas principal es SSO-SSE. En segundo término hay una orientación NO-SE y un tercer de N-S. Como efecto secundario del primer sistema de fallas, existe otro sistema de pequeñas fallas de orientación NE-SO. Es necesario un estudio detallado del estado de las fallas y su actividad.

7.4.3. Manantiales

Se define manantial como un punto o zona de la superficie del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua, procedente de un acuífero o embalse subterráneo. Es decir, que los manantiales son aliviaderos o desagües por los que sale la infiltración o recarga.

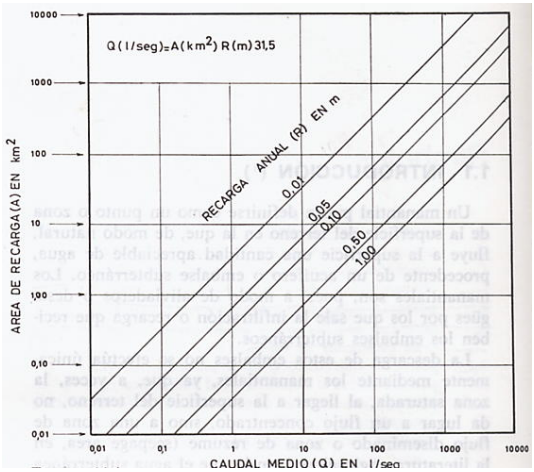
Se pueden clasificar según muchos criterios, y uno de ellos es en base al caudal. *Meinzer* en 1923 clasifica los manantiales en ocho grupos:

Orden	Caudal
Primero	Superiores a 2.80 m^3/seg.
Segundo	Entre 0.28 y 2.80 m^3/seg.
Tercero	Entre 28 y 280 l/s
Cuarto	Entre 6.3 y 28 l/s
Quinto	Entre 40 y 400 l/min.
Sexto	Entre 4 y 40 l/min.
Séptimo	Entre 0.5 y 4 l/min.
Octavo	Menor de 0.5 l/min.

Tabla.7.4.-Clasificación de manantiales según Meinzer, 1923

Los manantiales que existen en la zona de Jucuarán son de quinto y sexto orden (los de quinto orden son los de la zona de basaltos en lajas, donde son más caudalosos).

En la siguiente figura se representa la relación que existe entre el área de recarga del embalse subterráneo, la recarga anual por unidad de área y el caudal medio anual del manantial. Esta figura explica que sean escasos los manantiales de primer orden según la clasificación de *Meinzer*, pues requieren áreas de recarga de más de 100 km^2, aún suponiendo una infiltración eficaz del orden de medio metro, que no suele ser usual. Al mismo tiempo, puede explicar también la existencia de los pequeños manantiales que con frecuencia se encuentran en zonas relativamente elevadas de las montañas, ya que basta una superficie de unas pocas hectáreas para que en estas zonas, por lo general lluviosas, puede darse un manantial con caudal de algunos litros por minuto, suficientes para abastecer a una familia. Esto es lo que pasa en la zona de Jucuarán.



En la figura siguiente se representa el manantial que se origina cuando una zona más permeable (milonita, dique ácido...) toma contacto con una red de diaclasas saturadas. En otras ocasiones la milonita o el dique pueden ser más impermeables que la roca diaclasada y constituir una barrera que también puede dar origen a un manantial que descarga agua almacenada en las diaclasas de la zona aguas arriba de la milonita impermeable. Esta estructura de manantial es la que puede estar produciéndose en Jucuarán.

Fig.7.3.-Relación que existe entre el área de recarga del embalse subterráneo, la recarga anual por unidad de área y el caudal medio anual del manantial. (Custodio & Llamas. Hidrólogia subterránea)

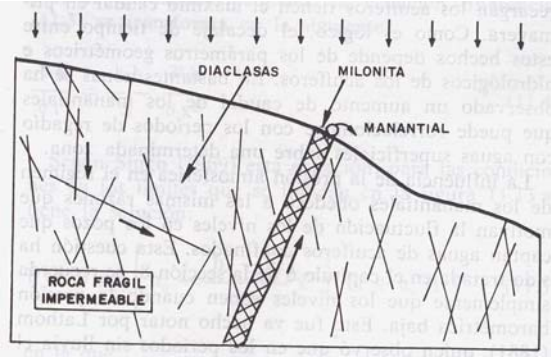


Fig.7.4.-Origen de manantial en zona de fractuarción. (*Custodio & Llamas. Hidrología subterránea*)

Del inventario de fuentes realizado en el estudio se observa que los nacimientos que dan una cantidad de agua aceptable (> 0.15l/s) son los puntos: nº de inventario de campo 40 (El Since, Q=9.26 l/s), nº 61 (Santa Lucia, Q=1.02 l/s), nº 62 (Q=0,26 l/s), nº 65 (Q= 0.6 l/s), nº 64 (Q=0.95 l/s), nº 99 (El Jutalito, Q=0.18 l/s), nº 95 y 96 (Río Samuria y las Flores, Q>1 l/s). Casi todos estos puntos coinciden en sus características geológicas e hidrogeológicas, ya que se sitúan en zona de basaltos-andesitas en forma de lajas, bastante duras, con fracturas y cerca o en zona de fallamiento. Además su caudal disminuye bastante en verano, cosa que indica una respuesta rápida a la recarga por lluvia, y a la descarga.

Fotografía 7.15.-El Since (El Llano)Basalto. Grietas sin relleno. Nacimiento muy bueno.

Fotografía 7.16.- Basalto. Grietas sin relleno.

Fotografía 7.17.-Toba. Grieta muy compacta. No permite paso de agua.

Fotografía 7.18.- Basalto en bolos. Arcilla en los contactos.

Fotografía 7.19.-Basalto. Grietas rellenas de arcilla

Fotografía 7.20.- Basalto. Grietas no rellenas.

Fotografía 7.21.-Nacimiento tapado en parte por material arrastrado por el Mitch.

Es pues, en estos puntos y zonas de fallamiento donde tiene que realizarse la exploración hidrogeológica, limpiando estas áreas, muchas veces tapadas por material de caída o por materiales acumulados durante el Huracán Mitch.

En la Quebrada Seca formada por materiales aluviales, coluviales cuaternarios existen una serie de nacimientos que abastecen a la zona del Espino y Arcos del Espino. Aunque no se ha podido medir el caudal, estas fuentes parece que pueden dar cantidades aceptables de agua, y por tanto sería una zona de posible exploración de aguas subterráneas, con la posibilidad de realizar pozo perforado para abastecimiento.

7.4.4. Parámetros hidrogeológicos

Como se ha mencionado, en el municipio de Jucuarán no existen pozos perforados de gran profundidad, y por tanto no se conoce la geología de subsuelo ni las características hidrogeológicas de las capas.

Se obtuvo los datos de perforación de un pozo situado en Chirilagua (al este de la zona de estudio), en una zona de características similares a la del municipio de Jucuarán.

Esta, puede servir para poder deducir los materiales y la hidrogeología de la zona estudiada, al menos, en las quebradas, que es donde se sitúa este pozo:

Pozo Chirilagua num. 2

Su ubicación geográfica está en las coordenadas X (UTM) = 233.400 e Y (UTM)= 595.550, a una altura topográfica de 240 m.s.n.m, y la profundidad del agua, en junio de 2002, era de 78.66 m.

En las pruebas de aforo se obtuvo:

Q aforo = 758 m^3/d
Descenso (s)= 7.5 m
Transmisividad (T) = 2458 m^2/d

Columna litológica	
Profundidad (m)	**Litología**
0-3	Sedimento aluvional
3-6	Sedimento aluvial-eluvial
6-67	Toba lítica
67-72	Toba brechada
72-110	Lava escoreácea

Tabla.7.5.-Columna litológica

La información obtenida de este pozo es representativa de los pozos perforados en materiales de la formación San Salvador. Este pozo está situado en la parte superior de una quebrada (Qda. Conchagüita), donde más abajo existen unos pozos excavados. Esta zona es similar a las quebradas que encontramos en el municipio de Jucuarán, sobretodo a la quebrada Seca (zona de aluvión). Por tanto, podríamos pensar en una similitud en cuanto a las características de las dos zonas.

En cuanto a la transmisividad y coeficiente de almacenamiento de los basaltos terciarios, considerar que es difícil de obtener debido ya que no se dispone de datos de pruebas de bombeos (por inexistencia de pozos profundos en la zona). Además, la variación lateral de la geología también dificulta mucho la estimación de un valor para toda la zona. Hay que tener en cuenta que se atraviesan materiales aluviales y lavas basáltico-andesíticas tanto en forma de lajas (no alterado) como en disyunción bolar (meteorizado). En principio podemos decir que existen zonas, sobretodo en el norte (El llano, El Coyol, El Zapote, El Potrero, Valle Seco, Samuria, Las Flores, Zapote, Gualora…) donde las permeabilidades pueden ser media-baja debido a fracturación, y otras partes donde las permeabilidades son muy bajas, por ser material compacto meteorizado, sin fisuración. Según la perforación del

pozo Chirilagua 2, el valor de transmisividad es de 2458 m^2/d para materiales aluviales cuaternarios. Según Custodio y Llamas (1996) las transmisividades en basaltos alterados fisurados del acuífero de Marruecos es de 1000 a 2500 m^2/d, mientras que en los basaltos compactos y tobas es de 100 a 700 m^2/d. La permeabilidad de estos materiales puede llegar a ser de 10^{-8} a 10^{-4} m/s. En la zona de Jucuarán la transmisividad debe ser baja, ya que con las observaciones de campo se pudo ver que al sacar agua de los pozos excavados tardaba en recuperarse el nivel en el pozo.

7.5. Balance hídrico

El balance hídrico para un acuífero o sistema de acuíferos, consiste en evaluar las entradas y las salidas de agua al sistema, para así determinar si existe sobreexplotación o bien si el sistema se mantiene en equilibrio.

Entradas = Salidas ± Δ almacenamiento
Precip. (+ agua de otras cuencas) = ET + Esc. Sup. + Esc. Sub (+ agua de otras cuencas) ± Δ almacenamiento

Si explotamos el agua que se puede renovar (considerando el período de unos años) se dice que explotamos los **recursos**. Si utilizamos más agua de la que puede renovarse, se dice que estamos explotando las **reservas**, y estamos produciendo **sobreexplotación**. En el Anexo 1 se presenta el mapa de zonas para el balance hídrico.

7.5.1. Límites del acuífero y condiciones de contorno

Para realizar el balance es necesario definir los límites del acuífero. La determinación de la recarga por infiltración de lluvia se realiza delimitando una serie de áreas caracterizadas por la predominancia de una litología y definidas por los límites del acuífero.

A partir de la piezometría dibujada podemos definir varias divisorias de agua, y así diferenciar cuatro direcciones de flujo en la zona:

- Flujo desde la divisoria de agua superficial hacia el este.
- Flujo hacia la vertiente norte desde la divisoria de aguas superficial
- Flujo hacia el oeste
- Flujo hacia el sur, dirección al mar

Es decir, los límites de esta zona estudiada (que no conforma un acuífero por sí solo) corresponden, en todos los casos, a divisorias de aguas superficiales. Se

considera área de estudio la integrada por la cuenca de aguas superficiales, con una extensión de 95.5 km^2 (ver Anexo 1, mapa de zonas para el balance hídrico). Sólo en la parte sur-occidental de la zona, existe un límite de nivel constante correspondiente al Estero San José.

7.5.2. Extracción de agua

Los datos de extracción de agua se realizan en base a la población existente en el municipio, atribuyéndoles un consumo diario de 50 l/hab/día. Sólo consideramos la población estimada que extrae agua de pozos excavados (Puerto Caballo, la Bocana, Casa Teja) y la población del Espino y Arcos del Espino que se abastece de un manantial situado en Qda. Seca. Esto es así porque en el balance considerado, como se ve más adelante, la zona de los cerros tiene una infiltración nula, y por tanto no podemos considerar su extracción, aunque sabemos que existe (realmente no es nula la infiltración). Pero no hemos podido deducir qué cantidad infiltra y se extrae, ni tampoco la descarga.

Puerto Caballo, La Bocana y Casa Teja:

500 personas x 50 l/hab/d = 25000 l/d = 0.01 Hm^3/año

El Espino y Arcos del Espino:

2114 x 50 = 105700 l/d = 0.04 Hm^3/año

Total de extracciones = **0.05 Hm^3/año**

Para riego e industria no existe una extracción de agua subterránea.

7.5.3. Infiltración por precipitación

La determinación de escorrentía subterránea en este estudio se ha basado siguiendo el método utilizado por J.R. Duarte, en el “Estudio hidrogeológico del acuífero de Guluchapa, San Salvador, El Salvador”.

Se han diferenciado tres zonas distintas dentro del área del acuífero, dependiendo del tipo de suelo y geología (ver Anexo1 mapa zonas balance hídrico). Esta zonificación es simplificada, y servirá para aplicar el balance hídrico en cada una de ellas.

a) Zona I. Perteneciente al área de las montañas de Jucuaran. Los materiales predominantes en esta zona son Basaltos-andesitas en lajas, basaltos andesitas en disyunción bolar y tobas. Pertenecen a la formación Bálsamo. Tiene una extensión 67 km^2. Se le asocia una infiltración que puede ser desde 0.05 a 0.28 %. Debido a lo observado en campo, en cuanto a los caudales de agua que pueden dar las fuentes situadas en estos materiales, distinguimos dos zonas dentro de ésta:

I. Basalto-Andesita en lajas: los nacimientos ubicados en estos materiales en general tienen un caudal superior, lo que haría pensar en que también su índice de infiltración sea mayor. Se les aplicará un I = 0.28 %. El área ocupada es de 18 km^2.
II. Basalto-Andesita en bolos: en estos materiales los nacimientos no dan tan buenos caudales por lo que el índice de infiltración aplicado será de 0.1 %. El área ocupada es de 49 km^2.

b) Zona II. En las quebradas, en su parte media-baja están formadas por materiales aluviales. Son materiales cuaternarios jóvenes que ocupan una superficie de 9 km^2. En la bibliografía se le asignan índices de infiltración desde 0.7 a 0.15 %.

c) Zona III. Depósitos de playa y manglar. Consideramos que los depósitos de playa son muy permeables, y los de manglar pueden ser menos permeables (más arcillosos), pero en el balance carecen de importancia, porque ésta es considerada la zona de descarga del agua subterránea (en el manglar). Además, las barras de arena que conforman la "isla" formada por los terrenos del Espino y Arcos del Espino, se consideraría como un acuífero por sí mismo, de baja potencia y extensión, separado del resto. La potencia de la formación arenosa de playa es de unos 4 metros y el espesor saturado (de agua dulce) de unos 2 metros de media (volumen de agua almacenada es = porosidad eficaz x potencia saturada x extensión = 0.26 x 2 m. x 6 500 000 m^2 = 3380000 m^3, es decir unos 3.4 Hm^3 de agua almacenada).

Nota: la porosidad eficaz de una arena media es de 26% según Custodio & Llamas. Hidrología subterránea.

7.5.4. Índice de infiltración

La precipitación es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico. Para el balance hídrico interesa la ***precipitación efectiva***, que es la porción de la precipitación que logra infiltrarse en el suelo, y por tanto, es disponible para ser utilizada por las plantas o bien para recargar el acuífero. Los factores que intervienen en su determinación son: intensidad de precipitación, la velocidad de la intensidad de precipitación, la cobertura vegetal y la

topografía. La precipitación efectiva se calcula multiplicando el índice de infiltración y la precipitación media mensual para una serie de años.

Para el cálculo del índice de infiltración es necesario obtener la capacidad de infiltración (f_c). Este valor se consigue mediante la realización de pruebas de infiltración en campo. Como no se han podido realizar en el presente estudio, se han utilizado los valores obtenidos en pruebas realizadas por *J.R. Duarte* con el método de *Porchet* (descrito en *Hidrología Subterránea* de *Custodio-Llamas, 1996*, Vol. I, pág. 345) en dos tipos de materiales diferentes que se pueden encontrar en el área de estudio: depósitos aluviales cuaternarios y lavas terciarias.

La fórmula utilizada para encontrar el índice de infiltración es la siguiente:

$$\%I = (-2.74 \times 10^{-5} f_c + 0.2284) \ln(f_c) + 0.000159 f_c - 0.586$$ (*Gunther Shosinsky*)

donde: %I: Porcentaje que se infiltra de la precipitación
f_c: Capacidad de infiltración básica (mm/día)

Para los aluviones se obtuvo una f_c de 280 mm/día y las lavas terciarias del Bálsamo de 45 mm/día. Estos corresponden a un índice de infiltración de 0.7% y 0.28% respectivamente. El porcentaje de infiltración de los depósitos aluviales indica que es en esta zona donde puede ocurrir la recarga del acuífero, en cambio en los materiales terciarios, el valor bajo de infiltración obtenido se puede correlacionar con una baja permeabilidad (material que podría considerarse impermeable en comparación con los aluviales).

En la siguiente tabla se muestran distintos índices de infiltración recopilados en la bibliografía. En el caso del acuífero estudiado, nos interesan los valores de las rocas efusivas de la formación Bálsamo y los depósitos aluviales cuaternarios.

Geología	**%I (J.R. Duarte, 1998)**	**%I (ANDA-PNUD, 1972)**	**%I (*)**
Lavas, cenizas y piroclásticas de la formación San Salvador		0.60	0.4
Cenizas volcánicas, tobas y mat. piroclástico (s_4)	0.67	0.05	0.20
Depósitos aluviales cuaternarios	0.7	0.15	0.30
Rocas efusivas de la formación Cuscatlán		0.4	
Rocas efusivas de la formación Bálsamo	0.28	0.12	0.05

Tabla.7.6.-Índices de infiltración *(*)E.H. Urbanización Parque residencial El Sitio.*

7.5.5. Precipitación efectiva

Una vez determinados los índices de infiltración se calcula la precipitación efectiva (definida en el apartado anterior) multiplicando los dos valores. Se dispone

Eliminado: ¶
¶

de los valores de precipitación de varias estaciones cercanas a la zona (ver estudio hidrometereológico), pero no se tienen valores de evapotranspiración potencial. Por este motivo se han utilizado los valores obtenidos en la estación La Carrera, al NE de Jucuarán (en la Unión). Comparando los datos de precipitación de ésta y los de estaciones como la de Jucuarán (dentro del municipio) se observa que son parecidos. Los valores de precipitación media mensual para una serie larga de años son:

Estación de La Carrera Latitud N: 13º19.8'
Longitud W: 88º31.5'
Elev. m.s.n.m.: 75

Mes	ene	feb	Mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
P	1	2	2	34	173	317	209	282	359	283	51	4

Tabla.7.7.-Precipitación media mensual en mm para la serie de años de 1970-1985

Precipitación efectiva

MES	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
$P_{(La\ Carrera)}$	1	2	2	34	173	317	209	282	359	283	51	4
P_e Z-I.I	0.29	0.57	0.57	9.72	49.46	90.63	59.75	80.62	102.64	80.91	14.58	1.14
P_e Z-I.II	0.1	0.2	0.2	3.4	17.3	31.7	20.9	28.2	35.9	28.3	5.1	0.4
P_e Z-II	0.7	1.4	1.4	23.88	121.49	222.62	146.78	198.04	252.12	198.74	35.82	2.81

Tabla.7.8.-Precipitación efectiva en cada una de las zonas.

Puede observarse que los valores (en mm) de precipitación efectiva en los materiales de la zona II (aluviales cuaternarios) son mucho más elevados que los de la zona I (materiales terciarios), es decir, que la cantidad de lluvia que logra infiltrarse en el suelo es muy superior en los primeros. Es en estas zonas donde se produce la mayor recarga.

7.5.6. Contenido de humedad del suelo

Este término se utiliza para referirse al agua retenida por el suelo, y así distinguirla del agua subterránea propiamente dicha. Se puede determinar en laboratorio, pero es aconsejable hacerlo en el campo. Los valores de contenido de humedad del suelo característicos son la capacidad de campo (contenido de humedad de un suelo que ha perdido su agua gravífica) y el punto de marchitez permanente (grado de humedad de un suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor que la de retención del agua por el terreno, y en consecuencia las plantas no pueden extraerla). El agua utilizable por las plantas es la que queda restando la capacidad de campo del punto de marchitez permanente. (*Custodio y Llamas, 1996*).

Estos valores se determinan en campo para cada tipo de zona, pero en el presente trabajo no se han podido realizar estas medidas, por lo que se utilizan los valores recopilados en bibliografía, en concreto del estudio de *Duarte* de 1998 para las zonas I y II.

Para encontrar la humedad en cm se usa la expresión (*Rodríguez, 1997*):

$$\text{Humedad (cm)} = \frac{humedad(\%)x\,\mathrm{Pr}\,of.radicular(cm)xdensidadSuelo(g/cm3)}{100}$$

Zona	Prof. Raíces (cm)	Densidad suelo (g/cm^3)	CC(%)	CC(cm)	PMP(%)	PMP(cm)
I.I	50	1.40	19.27	13.48	10.85	5.89
I.II	50	1.40	19.27	13.48	10.85	5.89
II	15	1.08	15.53	2.51	7.01	1.13

Tabla.7.9.-Contenido en Humedad de las diferentes zonas.
CC: capacidad de campo
PMP: punto de marchitez permanente

7.5.7. Cálculo de la recarga

El balance hídrico utilizado se basa en el método de *Penmann y Grindley*, considerando una variación lineal de la evapotranspiración potencial con respecto a la evapotranspiración real. Esta relación establece que a medida que el contenido de humedad del suelo se aproxima a su punto de marchitez, incrementa la dificultad para las plantas de obtener agua del suelo a través de las raíces, por lo que éstas cierran sus estomas con el fin de guardar humedad, es decir, que existe menos evapotranspiración. (*J.R. Durate, 1998*).

La implementación del balance hídrico se inicia en el mes de abril (estación seca), porque en este mes, la humedad inicial del suelo coincide o se aproxima al punto de marchitez permanente.

En las tablas 1, 2 y 3 se presentan los valores de recarga para cada una de las zonas. La recarga, según los datos de este balance sólo se produciría en los materiales aluviales cuaternarios de las quebradas, con un valor de 245.26 mm/año. En la zona montañosa formada por basaltos en lajas y bolos da un valor nulo de recarga. Tener en cuenta que los valores de humedad del suelo y capacidad de infiltración juegan un papel muy importante en el balance, y sería necesario realizar las pruebas en campo para cada zona. Esto, como se ha comentado, no ha sido posible realizarlo en el presente trabajo, y los valores usados de la bibliografía pueden no tener nada que ver con la realidad de la zona. Por esto, aunque el balance para los basaltos es nulo, no se debe tomar como totalmente cierto, sino que existe una cierta infiltración por zonas de fractura, a pesar de que ésta no sea muy elevada. Esta infiltración se manifiesta con los múltiples manantiales por donde descarga el agua.

El volumen total de recarga se calcula multiplicando la infiltración en mm/año por la superficie ocupada por cada tipo de material. Los valores obtenidos son:

Zona-I.I = 0 Hm^3/año
Zona-I.II = 0 Hm^3/año
Zona-II = 0.24526 Hm^3/km^2x año x 9 km^2 = 2.21 Hm^3/año

Volumen total **2.21 Hm^3/año**

7.5.8. Salida por límite de caudal constante

En este estudio consideramos para el balance hídrico la salida de agua a la zona de manglar y esteros, y de aquí hacia el mar. Este límite se considera de caudal constante.

El caudal de agua subterránea que descarga hacia el sur se calcula a partir de la piezometría.

Para su determinación se ha utilizado la *Ley de Darcy* (1856), válida considerando un flujo laminar (la zona de descarga está formada por materiales aluviales, por tanto la ley es aplicable). Ésta, establece que la velocidad de flujo (v_d) es directamente proporcional al gradiente hidráulico (i: diferencia de altura dos isopiezas, dividido por la distancia entre ellas) y a la conductividad hidráulica (k):

$$v = k \cdot i = -k \cdot \frac{dh}{ds}$$

Considerando que la transmisividad (T) es el producto de la permeabilidad hidráulica por el espesor saturado, el caudal que circula por una sección determinada de longitud L será:

$$Q = T \cdot i \cdot L$$

Para eso, se ha definido una sección perpendicular a las líneas de flujo de agua subterránea (ver Anexo 1, mapa de zonas de Balance hídrico). Esta línea trazada tiene 12 Km. de longitud. A través de ella, circula el flujo de agua subterránea hacia la zona de los esteros y del manglar. El gradiente hidráulico se ha calculado utilizando el mapa de isopiezas haciendo un promedio de los 12 Km., dando un valor de 0.03. En cuanto a la transmisividad ya se hicieron los comentarios pertinentes en el apartado de parámetros hidrogeológicos, y en definitiva se utilizará un valor de 10 m^2/día (no se sabe el valor).

Q = 10 m^2/d x 0.03 x 12 000 m = 3 600 m^3/día = **1.31 Hm^3/año**

7.5.9. Balance de masas final

Entradas:

- Infiltración lluvia = 2.21 Hm^3/año

Salidas:

- abastecimiento = 0.05 Hm^3/año
- salidas a esteros= 1.31 Hm^3/año
- salidas por los manantiales= 0.45 Hm^3/año

Entradas-Salidas = variación del almacenamiento

Infiltración = abastecimiento + Salida esteros + variación almacenamiento

Las salidas por los manantiales de la zona de los cerros no las consideramos, ya que igualan a las entradas en la misma zona (zona de basalto-andesita en lajas, sobretodo). Además, el balance aplicado en esta zona salió como que no infiltra agua, así que no lo podemos considerar como salida. Tampoco se tiene el valor de las salidas por los manantiales porque no se pudieron medir todos. Teniendo en cuenta esto, el balance se centra en la zona de los materiales cuaternarios, y las entradas corresponden sólo a los aluviales. Estas entradas son de 2.21 Hm^3/año, y la salida es por el limite de caudal constante a los esteros y es de 1.31 Hm^3/año más las extracciones de los pozos situados en esta zona 0.05 Hm^3/año.

2.21-1.31- 0.05 Hm^3/año = **variación de almacenamiento = 0.85 Hm^3/año**.

Es un valor positivo, cosa que indica que las entradas superan a las salidas, y por tanto se estaría recargando el acuífero. Sin embargo, puede que las salidas por el estero sean superiores por una transmisividad más elevada de la considerada (considerando una T = 15 m^2/día, Q = 2 Hm^3/año, y el balance sale de 0.16 Hm^3/año) o bien que exista alguna salida del acuífero por otras zonas (a más profundidad por alguna fractura o salidas laterales). Por falta de datos no podemos establecer un buen balance. En caso de ser realmente positivo, esto se puede explicar por las pocas extracciones que se realizan y por una dificultad de paso del agua de los aluviales a los depósitos de manglar, que constituirían un sello.

Esquema del balance de masas (Hm^3/año)

R: recarga por infiltración
B: bombeo
Qest:caudal salida (Q=cte.)

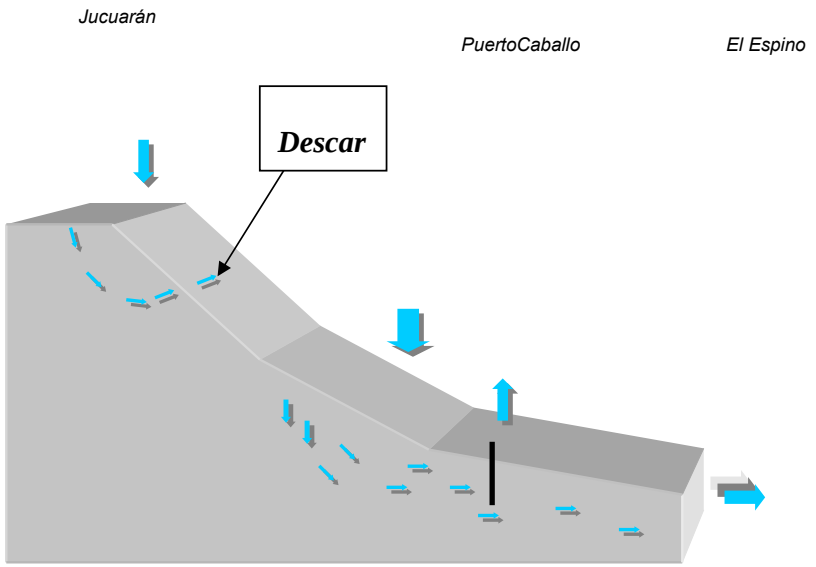


Fig.7.5.-Balance de masas Hm^3/año

Existe otro método para evaluar cuantitativamente la recarga, que es el balance de masa de un trazador químico ambiental, en este caso el ión Cl^-. Para esto, en realidad es necesario disponer de medidas de la concentración de este ión en la lluvia y en el agua freática de la zona principal de recarga durante varios años. Esto permitiría calcular un valor medio multianual de la recarga suponiendo un régimen estacionario de recarga y de transporte de masa entre la superficie del terreno y la superficie freática. No se dispone de estos datos, pero de todas formas, ya que no existen datos completos para ninguno de los métodos de cálculo de recarga, se ha realizado el cálculo con los datos de precipitación que se dispone de la estación La Carrera y con datos de cloruros en la precipitación en la Ringlera y en el agua freática de esta zona, sólo para tener una orientación del resultado que da. Se obtiene que un 25 % del agua de lluvia es recargada al acuífero.

Precipitación x Cl^-_p = Recarga x Cl^-_r

Recarga = (1716 mm x 6 ppm)/24 ppm = 429 mm

Este valor es casi el doble del que ha dado en el balance anterior, y esto es debido a los múltiples errores cometidos en los dos métodos por falta de datos.

7.5.10. Discusión del balance

El resultado obtenido no es nada satisfactorio, debido a los múltiples errores por falta de datos reales de la zona, y por tratarse de una zona compleja hidrogeológicamente, donde no se puede simplificar tanto. Además, ya se comentó que no se trata de un acuífero por sí solo, sino que forma parte de un acuífero de mayor extensión.

En la zona de basaltos puede pensarse en una recarga-descarga bastante local a través de las fracturas en estos materiales, fracturas bastante superficiales (ya que quedarían cerradas en profundidad), si bien es verdad, que no se conoce bien las fallas, y podría ser que a través de ellas se produjera recarga a más profundidad. La descarga se realiza por las múltiples fuentes de la zona. Según el grado de fracturación y de la interconexión entre las fracturas, existen nacimientos con caudales más grandes y constantes que otros, que corresponden a la descarga de acuíferos colgados. Esta agua infiltrada en las montañas no logra llegar a los esteros, sino que sería descargada antes de llegar a las zonas bajas. En principio podría evaluarse parte de las descargas de los manantiales si se tuvieran los caudales de cada uno de ellos. Con los datos recopilados en campo se ha calculado un caudal global de descarga a través de las fuentes de 0.45 Hm^3/año (sólo con los caudales que se ha podido medir y en época de lluvias). Este valor es orientativo para estimar la cantidad de agua infiltrada en esta zona. Además, esto demuestra que los basaltos de la zona no son totalmente impermeables, y que a falta de otras fuentes de agua, deben tenerse en cuenta para el abastecimiento de los caseríos cercanos. En el capítulo de modelo conceptual se encuentran comentarios sobre los manantiales.

7.6. Residuos sólidos urbanos

Gran parte de la contaminación de las aguas subterráneas proviene de los alcantarillados de las ciudades y de los lixiviados de los desechos sólidos. Esto cobra importancia en materia de riesgos para la salud de la población, al vincularlo al hecho que, hasta hace poco, el único mecanismo de disposición final de desechos

sólidos urbanos que no es a cielo abierto en El Salvador es el relleno sanitario que funciona desde el 2000 en Nejapa, el cual es utilizado por 10 municipios del AMSS y recibe unas 1000 toneladas de basura al día. El resto de ciudades del país, que producen unas 1000 toneladas diarias de desechos sólidos, continúan depositándolos en predios baldíos, quebradas, o lanzándolos y quemándolos en botaderos a cielo abierto.

Datos registrados por ANDA reflejan que de los 262 municipios del país, solamente 82 cuentan con alcantarillados en las áreas urbanas; que únicamente entre 2 y 3 % de las aguas residuales, de toda la población que tiene servicio de alcantarillado, recibe algún tipo de tratamiento antes de ser vertidas a las quebradas y ríos.

En relación con los vertidos provenientes de procesos industriales, en 1995, el Ministerio de Salud encontró que de 1610 industrias y agroindustrias registradas, 1270 no hacían tratamiento de los desechos antes de ser vertidos, 199 les daban algún tipo de tratamiento, y 113 no producían vertidos. Un estudio de FUSADES en 1997 encontró que el 90 % de las industrias situadas en San Salvador, vertían sustancias altamente tóxicas sin ningún tipo de tratamiento previo.

7.6.1. Ubicación para un vertedero de RSU en Jucuarán

En el municipio de Jucuarán se han identificado seis botaderos incontrolados, donde la población vierte los residuos que generan. Sin embargo el inventario se queda corto si vemos más a detalle cada comunidad. Estos puntos identificados son:

Num	municipio	Cantón	Caserío	X (UTM)	Y(UTM)
1	Jucuarán	Samuria	Samuria	363330	1464800
2	Jucuarán	El Llano	Jucuarán	365212	1465190
3	Jucuarán	El Jícaro	Arcos Espino	358960	1456643
4	Jucuarán	El Jícaro	Arcos Espino	359209	1456485
5	Jucuarán	Samuria	Los Conventos	358598	1462708
6	Jucuarán	Jucuarán	El Almendro	363910	1467883

Tabla de los puntos identificados, el 1, 2, 5 y 6 corresponden a quebradas, donde aguas abajo existen nacimientos utilizados para abastecimiento (fuente que abastece Las Flores y Samuria, Colonia Santa María y Los Conventos respectivamente en los tres primeros). En Anexo 2 y 1 respectivamente se presentan las fichas de estos puntos y un mapa con su ubicación.

Fotografía 7.22.- Punto 1: Botadero de Samuria

Fotografía 7.23.-Punto 3. El Jícaro (Arcos del Espino)

Fotografía 7.24.-Punto 4: El Jícaro (Arcos del Espino)

Fotografía 7.25.- Punto 5: Botadero de El Almendro

Por este motivo se ha considerado necesario recomendar la clausura y recuperación de estos espacios, y buscar una alternativa. En esta línea, la primera idea, era la posible construcción de un relleno sanitario dentro del municipio. Pero los resultados obtenidos en el estudio geológico e hidrogeológico muestran una inviabilidad para realizar este proyecto debido a varios factores. En el Anexo1 se muestra el mapa que ilustra las distintas características del terreno, por las que no es posible realizar un vertedero. Este mapa se ha realizado con datos de “El Estudio de control integral de crecidas en el Río Grande de San Miguel en la República de El Salvador” (1997), con fotografía aérea y con datos obtenidos en visitas de campo.

En el mapa se han superpuesto distintos características del terreno:

- pendientes
- zonas de inundación de quebradas
- zona de inundación del Río Grande de San Miguel
- zona de manglar y de playa
- litología-acuíferos de la zona

- fallas existentes

Observando el mapa destacamos que no existe ni un solo punto donde sea posible la ubicación del vertedero, añadiendo la mala accesibilidad.

En la **zona de las montañas** las pendientes son elevadas, el acceso es limitado, y además, el acuífero que existe es superficial, situado en basaltos en lajas fracturado, cosa que facilita la infiltración de lixiviados, y por tanto, comporta un alto riesgo al ubicar allí un vertedero. Donde la litología es de basalto alterado y bolos, la permeabilidad se reduce, pero igualmente existen fracturas que facilitarían la infiltración. Si bien es verdad que pueden tomarse medidas de impermeabilización del terreno para la construcción del vertedero, esto supone un riesgo en la zona que debe evitarse.

En la **zona de las quebradas** los factores en contra de la ubicación del vertedero son: se trata de una zona de inundación en períodos de lluvia con una escorrentía superficial muy elevada y arrastre de material sólido; además las quebradas formadas por depósitos cuaternarios, constituyen el acuífero productivo del municipio, y es un acuífero superficial. Esto implica una fácil infiltración de lixiviados y contaminación.

En la **zona de manglar y playa** no se puede ubicar el vertedero, por ser zona de inundación por parte de las mareas y del propio manglar, y donde existe un gran ecosistema susceptible a la contaminación por lixiviados y otros (ruidos, olores…que alteren el ecosistema). El acuífero en esta zona existe en las arenas de playa del Espino y Arcos del Espino, material muy permeable, susceptible al oleaje y mareas, y por tanto inestable. Añadiendo a esto que es un acuífero superficial, es evidente la inviabilidad de ubicar el vertedero en estos materiales.

7.6.2. Características de una zona para Relleno Sanitario

Según el MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales), las áreas que se destinen para relleno sanitario deben presentar, como mínimo, las características siguientes:

- Estar ubicadas a una distancia que garantice que las zonas de recarga de los acuíferos o de fuentes de abastecimiento de agua potable, estén libres de

contaminación. Esta distancia será fijada dentro de las normas técnicas nacionales;

- Que el suelo reúna características de impermeabilidad, aceptándose un coeficiente máximo permisible de infiltración de 10^{-7} cm/s; que posea características adecuadas de remoción de contaminantes; y que la profundidad del nivel de las aguas subterráneas garantice la conservación de los acuíferos existentes en la zona. En caso de que se carezca de este tipo de suelos, se podrá trabajar con un mayor espesor de la capa, para lograr el mismo nivel de impermeabilidad;
- Contar con suficiente material térreo para la cobertura diaria de los desechos sólidos depositados durante la vida útil;
- Estar ubicado a una distancia no perjudicial para las zonas de inundación, pantanos, marismas, cuerpos de agua y zonas de drenaje natural;
- Estar ubicado a una distancia de 500 metros de los núcleos poblacionales y con un fácil acceso por carretera o camino transitable en cualquier época del año;
- Estar ubicado fuera de las áreas naturales protegidas o de los ecosistemas frágiles, así como de las servidumbres de paso de acueductos, canales de riego, alcantarillados y líneas de conducción de energía eléctrica;
- Estar ubicado a una distancia mínima de 60 metros de fallas que hayan tenido desplazamientos recientes.

Los criterios de exclusión de un territorio para la construcción de un vertedero son, según el MARN:

- A más de 3 Km. de un aeropuerto utilizado por aviones turbo-jet y de 1.5 Km. de un aeropuerto utilizado por aviones de hélice;
- No pueden localizarse dentro de 60 m. a partir de una línea de falla que haya tenido un desplazamiento en el período holocénico. (Últimos 10 000 años);
- No se puede localizar en zonas de impacto sísmico;
- No se puede localizar en zonas inestables, aquellas propensas a deslizamientos e inundaciones del terreno, zonas de geología cárstica susceptibles de formación de sumideros y zonas de minas subterráneas;
- Sitios culturales y/o arqueológicos;
- Zonas de riego y drenaje

Los criterios de selección son:

- Vías de acceso a los municipios, a fin de obtener un sitio de disposición final de carácter intermunicipal;

- Mayores productores municipales de desechos sólidos

7.6.3. Alternativas a la construcción del Relleno Sanitario

Las alternativas para tratar los residuos es buscar un emplazamiento en otro municipio para la construcción de éste, o bien verter los residuos sólidos en algún vertedero ya existente cercano a la zona. En este sentido, existe el botadero de basura de Usulután, donde más adelante se explica su funcionamiento y características. Pero mientras no se pueda verter en ningún botadero, pueden realizarse acciones para reducir la producción de residuos. Estas acciones dependen, en gran parte, de la actitud de la población, y por este motivo es necesario concienciarla mediante jornadas explicativas o talleres en que participe todo el municipio.

Para la gestión de la basura comunitaria puede realizarse la creación de un almacén comunitario para el aprovechamiento de los materiales reutilizables y reciclables que se generan en la comunidad. Promover el desarrollo local sustentable con la comunidad a través de la educación ambiental. Desarrollar alternativas económicas mediante la recuperación por el reciclaje y reutilización de los Residuos Sólidos Urbanos. Investigar y promover el aprovechamiento de los Residuos Sólidos Urbanos con la participación comunitaria. Fomentar en la comunidad la capacidad de comprender en forma de autogestión el problema del tratamiento inadecuado de los Residuos Sólidos Urbanos.

En el Anexo 3 se enumeran una serie de acciones recomendadas por el grupo Ecologistas en acción para reducir la producción de residuos.

7.6.4. Efecto de la basura sin una buena gestión

Contaminación del agua: al verter la basura en una quebrada, por escorrentia superficial es transportada a varios puntos, contaminando las aguas superficiales en todo su recorrido. Además, por infiltración de esta agua junto con los lixiviados de la basura se contamina el agua subterránea.

Contaminación del aire: mal olor y al quemarla, producción de gases tóxicos.

Deterioro de la flora y la fauna: algunos animales que se acercan a comer en los vertederos pueden intoxicarse. También existe proliferación de ratas que conllevan enfermedades.

Contaminación del suelo: lixiviados que quedan retenidos en el suelo no saturado.

Daños socio-económicos: insalubridad, pérdida de bienes como agua, suelo, aire, fauna y flora.

7.7. Prospección geofísica

Para la realización del presente capítulo se ha contado con la colaboración del departamento de Hidrogeología del programa ANDA-FIAS.

Se define *prospección geofísica* como la ciencia y técnica que, a partir de fenómenos físicos, naturales o provocados, trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades.

El objetivo de este estudio es determinar estructuras del subsuelo y la profundidad del agua en dos zonas del territorio: quebrada Seca y El Llano. Para lograrlo se desarrollaron dos etapas: la primera consistió en obtener la distribución de la resistividad aparente en el subsuelo y la segunda, buscar el significado geológico de tales resistividades. La primera se basa en leyes Físico-Matemáticas, mientras que la segunda depende fundamentalmente de correlaciones entre datos físicos y datos geológicos.

El método utilizado es el SEV (Sondeo Eléctrico Vertical) con dispositivo Schlumberger. La característica física que utiliza es la resistividad o resistencia específica de los diferentes terrenos en función de la profundidad. Para obtener esto, el dispositivo Schlumberger, exige aumentar progresivamente la distancia de los electrodos de corriente respecto a un punto central fijo, como se puede ver en la figura que sigue.

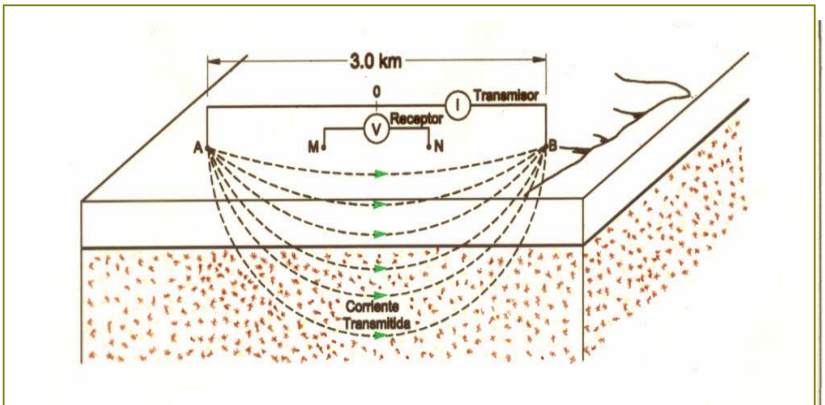


Fig.7.6.-Arreglo del dispositivo de Schlumberguer

En este arreglo, los electrodos de corriente AB se desplazan progresivamente desde el punto central y en dirección opuesta, mientras que la distancia de los electrodos de potencial MN se mantiene fija. En algunos puntos se realiza lo que se

conoce como empalmes en los cuales se toman dos medidas con diferentes distancias entre MN.

En superficie se efectúan una serie de medidas, que permiten obtener resistividades aparentes, en función de la línea de emisión u otro parámetro lineal. Los resultados de los SEV se representan gráficamente en papel bilogarítmico. En el eje de las abscisas (eje x), se detallan las semidistancias entre los electrodos de corriente, es decir la distancia AB/2, y en el eje de las ordenadas (eje y) se grafican los valores de la Resistividad Aparente del suelo (*ρa*). Los puntos de inflexión de las curvas representan límites de estratos, es decir que, como primera aproximación, el espesor del estrato se determina midiendo la longitud entre puntos de inflexión. Realmente la interpretación de las curvas se realiza a partir de ábacos o de programas de computadora especializados.

La Resistividad Eléctrica ***ρ* (Ro),** es una propiedad física de la roca expresada en Ohm-metro **(Ω-m),** que depende en gran parte de la presencia de agua y de la salinidad de la misma, además del grado de compactación de los materiales y su contenido en arcillas. Por tal razón, es difícil establecer una correlación general del valor de la Resistividad aparente y el tipo de roca, siempre se requiere de información estratigráfica con la cual poder comparar los resultados obtenidos, y por supuesto, de mucha experiencia.

En principio, solo son conductores los materiales metálicos y algunas de sus sales. El terreno, por lo tanto, sería en general aislante o de resistividad muy elevada. Pero en todos los materiales del terreno existen poros saturados o no de agua, aunque siempre con una cierta humedad. El agua, por la presencia de las sales disueltas, en proporción que depende de la temperatura, actúa como un conductor, cuya resistividad o resistencia específica oscila en la practica entre 0.03 ohmios-metro (agua de mar) y 3000 ohmios-metro (agua extraordinariamente pura, obtenida por destilación con precauciones especiales). (*Custodio & Llamas*).

La resistividad de las rocas dependerá por lo tanto, del volumen de sus poros, de su distribución y de la resistividad del líquido que los rellena.

Se comprende que no es posible clasificar los terrenos por la resistividad, ya que esta característica eléctrica está ligada a la porosidad, al contenido de agua y su resistividad. Sin embargo, sí existe una cierta relación indicativa y lo que es más interesante, conocido el terreno y su situación respecto al nivel freático, podemos deducir su porosidad de forma aproximada y cualitativa y del mismo modo la calidad del agua que rellena los poros. A efectos hidrogeológicos, una porosidad baja se manifiesta con una resistividad elevada. Si la roca se encuentra sobre el nivel freático, o no contiene agua, la resistividad será elevada. Si la resistividad es muy baja, el agua almacenada tendrá un elevado contenido de sales. (*Custodio & Llamas*).

En El Salvador se han logrado correlacionar algunos valores de Resistividad Aparente de las rocas con algunos materiales geológicos, la tabla siguiente muestra los datos de esta correlación.

	LITOLOGIA	**GRADO DE HUMEDAD**				**OBSERVACIONES**	
		SECO	**HUMEDO**	**CAPILAR**	**SATURADA**		
CE	**Materiales lodosos y arcillosos**		**50 - 300**		**10 - 50**	Q	**Cuaternario**

N I Z A	**Volcánica, poco compacta**	**1000 - 4000**	**300 -800**	**200 -300**	**100 -200**	Q	
	Volcánica masiva, poco consolidada	**> 1000**	**300 -600**			Q	
T O B A	**Alterada**	**100 - 1000**	**10 - 100**		**10 - 50**	T	**Terciaria**
	Fundida	**1000 - 3000**	**500 - 1000**		**100 - 200**	T	
	Muy Fracturada		**200 -5000**		**100 - 200**	T	
	Masiva	**>3000**				T	
L A V A	**Andesita- Basáltica , alteración de bloques, arenas de regular tamaño**		**< 100**	**100 - 200**		T	**Terciaria**
	Andesítica Basáltica fracturada		**300 - 600**			T	
	Andesítica Basáltica muy fracturada		**200 - 300**		**100 - 200**	T	
	Muy Fracturada				**100 - 200**	K	**Cretáceo**
	Masiva	**>3000**			**200 - 500**	K	
	Material Arcilloso		**5 - 50**				
	Suelo Superficial	**>100**	**5 - 50**		**50 - 200**		

7.7.1. Trabajos realizados

Se ha realizado una campaña de campo de dos días, el 12 y 13 de noviembre de 2003, para realizar 6 sondeos. Éstos se ubicaron de manera que las condiciones topográficas permitieran su realización. Con respecto a la topografía, el método recomienda que no se realicen mediciones en terrenos cuya pendiente exceda los 30º, y que los desplazamientos de los electrodos A y B se verifiquen en una línea recta, lo mismo para M y N. Los lugares seleccionados eran los de mayor interés hidrogeológico.

Para tener una buena correlación con los resultados, se llevó a cavo lo que se conoce como calibración de equipo, lo cual consiste en realizar un Sondeo Eléctrico lo más cerca posible de un pozo del cual se tiene información estratigráfica, y se correlacionan los valores de resistividad aparente obtenidos con la columna estratigráfica del pozo. En nuestro caso el pozo seleccionado fue el pozo de Chirilagua. En ese sitio se realizó el SEV 1. La columna estratigráfica obtenida en la perforación del pozo se muestra en la siguiente tabla:

Profundidad (m)	Pozo Chirilagua N233.45 E595.55 140m.s.n.m
0-6	Arcillas
6-57	Toba lítica
57-72	Toba brechada (n.e ≈61 m)
72-110	Toba lítica

Después se realizaron tres SEVs en línea a lo largo de la Quebrada seca, ya que se trata de una zona con muchos pozos excavados y con el nacimiento que abastece al Espino y Arcos del Espino. Los últimos dos sondeos se realizaron en El Llano, eligiendo esta zona porque es allí donde se encuentran los manantiales con caudales superiores, y además al tratarse de una zona más o menos llana, es posible realizar estas pruebas. La intención inicial era poder determinar las características de la falla que hay en esta zona, pero debido a la topografía no se pudo hacer, y simplemente se realizaron dos sondeos no muy separados para poder ver qué pasa en profundidad.

Sondeo	X (UTM)	Y(UTM)	Orientación
1 (P.B. Chirilagua)	378616	1461428	O-E
2 (Qda. Seca)	360940	1458741	N-S
3 (Qda. Seca)	361019	1459106	N-S
4 (Qda. Seca)	360940	1458810	N-S
5 (El Llano)	364640	1463426	N-S
6 (El Llano)	364600	1463306	N-S

Tabla.7.13.- Ubicación de los Sondeos (SEV) realizados

La interpretación de los sondeos eléctricos verticales se llevó a cabo mediante el modelo de capas paralelas empleando el arreglo Schlumberger, con una separación de electrodos de corriente con una abertura máxima de éstos de AB/2= 500 m., y variando los electrodos de potencial MN desde 1.0 m. hasta 80 m. como máximo. El equipo de prospección empleado fue: un McOHm Mark 2 de fabricación Japonesa, modelo 2115 A, cuatro bobinas de cable eléctrico, electrodos de corriente y electrodos de potencial.

El cálculo y determinación de profundidades y resistividades se hicieron a partir de la interpretación cuantitativa de los datos de campo para lo cual se utilizó el programa de computadora conocido como RESIX (Plus).

7.7.2. Resultados

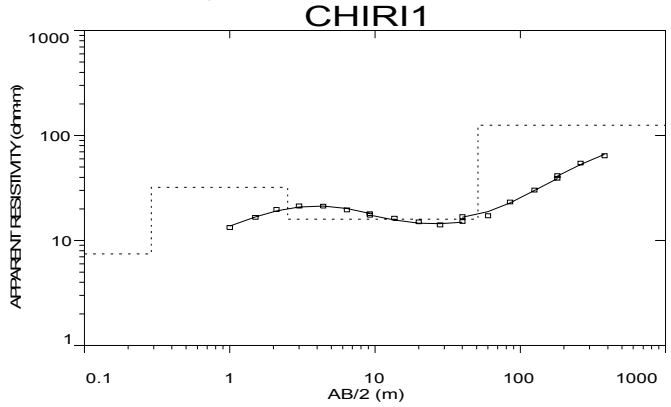
En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en los SEV:

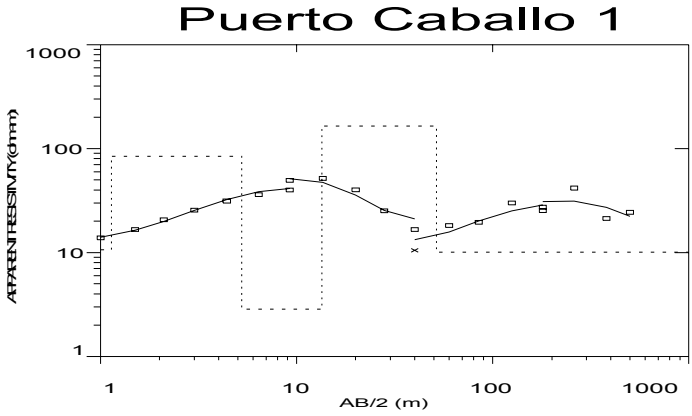
Sondeo No.	Ubicación		Elevación (msnm)	Resistividades y Espesores de Capas
	Norte	Este		
1 (Chirilagua)	233.45	595.55	140	ρ_1 = 7.4 Ω-m h_1 = 0.3 m ρ_2 = 32.0 Ω-m h_2= 2.2 m ρ_3 = 16.0 Ω-m h_3 = 49.0 m ρ_4 = 125.0 Ω-m (espesor indeterminado)

2 (Puerto Caballo)	230.50	577.90	20	ρ_1 = 10.6 Ω-m h_1 = 1.2 m ρ_2 = 84.5 Ω-m h_2 = 4.1 m ρ_3 = 2.8 Ω-m h_3 = 8.2 m ρ_4 = 165.1 Ω-m h_4 = 38.1 m ρ_5 = 10.1 Ω-m (espesor indeterminado)
3 (Puerto Caballo)	230.80	577.98	20	ρ_1 = 23.6 Ω-m h_1 = 1.4 m ρ_2 = 12.2 Ω-m h_2 = 16.4 m ρ_3 = 40.1 Ω-m h_3 = 26.6 m ρ_4 = 7.3 Ω-m h_4 = 114.6 m ρ_5 =50.9 Ω-m (espesor indeterminado)
4 (Puerto Caballo)	231.00	578.00	20	ρ_1 = 38.9 Ω-m h_1 = 0.3 m ρ_2 = 135.0 Ω-m h_2 = 7.3 m ρ_3 = 27.3 Ω-m h_3 = 20.7 m ρ_4 = 9.5 Ω-m h_4 = 144.1 m ρ_5 =120.5 Ω-m (espesor indeterminado)
5 (El Llano)	235.24	581.36	520	ρ_1 = 34.0 Ω-m h_1 = 0.8 m ρ_2 = 122 Ω-m h_2 = 26.0 m ρ_3 = 200 Ω-m h_3 = 22.0 m ρ_4 = 45.0 Ω-m h_4 = 177 m ρ_5 =11.0 Ω-m (espesor indeterminado)
6 (El Llano)	235.12	581.32	515	ρ_1 =37.9 Ω-m h_1 = 0.5 m ρ_2 =156.2 Ω-m h_2 = 1.4 m ρ_3 =92.7 Ω-m h_3 = 49.3m ρ_4 =2846 Ω-m (espesor indeterminado)

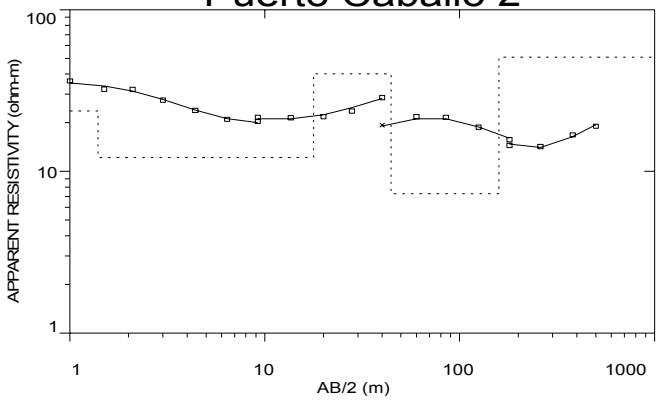
Tabla.7.14.-Resultados obtenidos en los SEVs.

Las curvas de campo ajustadas a curvas teóricas se muestran a continuación.

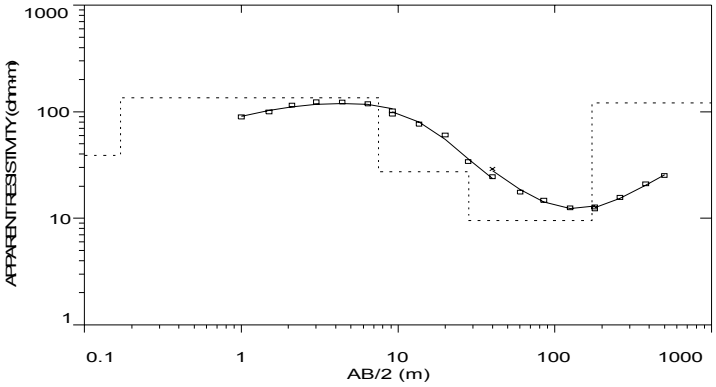




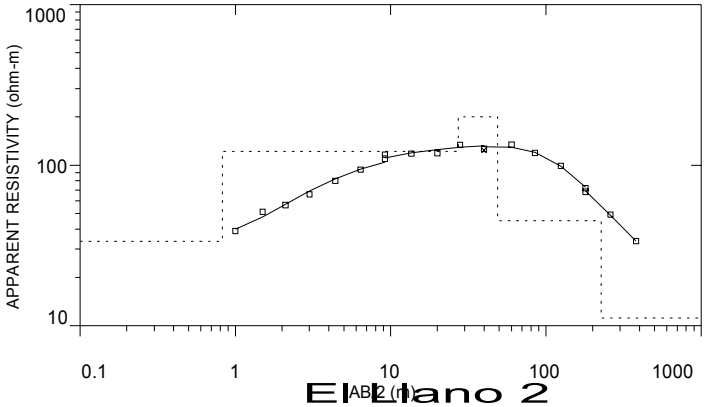
Puerto Caballo 2



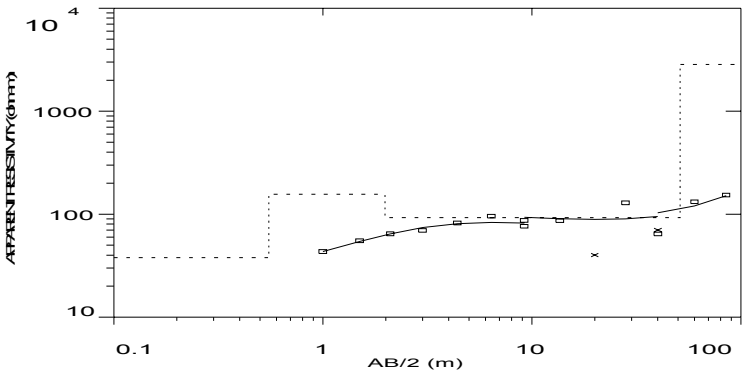
Puerto Caballo 3



El Llano 1



El Llano 2



Figs.7.7.-Curvas de campo ajustadas a las curvas teóricas.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en los modelos unidemensionales de los sondeos se elaboraron dos secciones geoeléctricas (ver Anexo 3, perfil A-A' y B-B'). De éstos se dará una interpretación geológica de los estratos u horizontes obtenidos en los perfiles Geoeléctricos:

Perfil geoeléctrico A-A'

Este corte geoeléctrico está formado por los SEV 2, SEV 3 y SEV 4 y está orientado 10 grados Noreste (ver Anexo 1, mapa de ubicación de SEV). En este perfil se lograron definir cuatro capas u horizontes geofísicos, la primera capa con un espesor promedio de 5 m. y resistividades aparentes que oscilan entre 11 y 39 Ohm-m. la podemos asociar con una intercalación de sedimentos aluviales-eluviales y suelo superficial con mucho material orgánico. La segunda capa u horizonte presenta resistividades aparentes del orden de los 150 Ohm-m. y un espesor promedio de 45 m. La reducción de la resistividad por abajo del SEV 3 en esta capa, obedece a un incremento en la porosidad y permeabilidad del estrato, probablemente saturado, lo cual lo podemos asociar también, con un material tobaceo. La tercera capa con un espesor promedio de 100 m. y resistividades aparentes del orden de los 9 Ohm-m. lo podemos asociar con un material en proceso de descomposición (material alterado a arcillas). La última capa de espesor indeterminado y resistividades aparentes del orden de los 120 Ohm-m. la podemos asociar con una lava fracturada, seguramente correspondiente al basamento terciario.

Perfil geoeléctrico B-B'

Este perfil geoeléctrico está conformado por los SEV 5 y SEV 6 y está orientado 10 grados Noreste. En este perfil, al igual que en el anterior, se lograron definir claramente cuatro horizontes u estratos geoeléctricos. La primera capa de espesor promedio de 1.0 m. y resistividades aparentes del orden de los 36 Ohm-m. la podemos asociar con la capa vegetal. La segunda capa de un espesor promedio de 45 m. y resistividades aparentes que oscilan entre los 124 y los 160 Ohm-m. la podemos asociar con un basalto andesítico en lajas y que por el rango de los valores de resistividad aparente obtenidos podría estar fracturado. La tercera capa, la cual fue bien definida por abajo del SEV 5, presenta un espesor de 177 m. y resistividades aparentes del orden de los 45 Ohm-m., la podemos asociar con un basalto o toba alterada. La cuarta capa de espesor indeterminado y resistividades aparentes del orden de los 11 Ohm-m., lo podemos asociar con un material arcilloso.

7.7.3. Conclusiones

Los sondeos realizados fueron de buena calidad y presentaron casi un mismo comportamiento.

Según la columna estratigráfica del pozo de Chirilagua, los estratos fracturados y saturados presentan una resistividad aparente del orden de los 125 Ohm-m.

Cuatro de los seis sondeos alcanzaron una buena profundidad de prospección entre los 170 y 240 m. El SEV 1 se hizo para calibrar el equipo.

Mediante la prospección geofísica se logró determinar que el recurso subterráneo se encuentra en el sector de Puerto Caballo, en las quebradas, a una profundidad no mayor de los 35 metros o de presentar una permeabilidad secundaria, éste estaría a una profundidad mayor de los 170 m. Entre los 35 m. y los 170 m. de profundidad existen unas arcillas, y por tanto no puede explotarse el recurso hídrico. En el sector de El Llano este recurso presenta una permeabilidad secundaria y a profundidades no mayores a los 50 metros.

A la profundidad de investigación, en la zona de la quebrada Seca, se interpreta que se logró llegar a la roca basal (Basamento Terciario).

Tomando en cuenta los resultados obtenidos es de esperar que a una mayor profundidad los materiales se encuentran en proceso de descomposición.

Los resultados obtenidos en la presente investigación son resultados preliminares y solamente cuando se tengan resultados de una exploración directa se podrá dar una interpretación más real al significado geológico de los valores de resistividad aparente obtenidos.

Fotos de campo

Fotografías 7.26, 7.27, 7.28, 7.29, 7.30 y 7.31.

8. ANÁLISIS DE INUNDACIONES

La amenaza por inundaciones en el municipio de Jucuarán se centra en las partes bajas de las quebradas y ríos donde se supera la capacidad de drenaje y la configuración plana del terreno facilita la expansión de la lámina de agua.

Por otro lado, las características morfológicas de las subcuencas y de los propios cauces (ver capítulo 5) *hacen que cualquier punto de la red de drenaje pueda sufrir cambios bruscos del nivel de agua, abarcando una zona susceptible de ser regada dependiente de las características intrínsecas de cada punto.*

También se incluye como un aspecto de las inundaciones la escorrentía superficial no canalizada, que por si solo provoca una amenaza al existir poca infiltración y un alto escurrimiento por las laderas, además del potencial erosivo de suelo de esas aguas que pueden canalizarse modificando sustancialmente las condiciones del terreno.

En este estudio se han tenido en cuenta los datos obtenidos en campo, a partir de los cuales se ha realizado un inventario de puntos; y los obtenidos mediante el análisis de precipitaciones, ya que es uno de los principales factores desencadenantes de los procesos de erosión, desbordamiento e inundaciones que afectan al municipio (ver apartado 8.3)

8.1. Caracterización de la amenaza

Además de la intensidad y cantidad de agua caída durante el evento climatológico, las avenidas e inundaciones van a estar condicionadas por las características intrínsecas del terreno: su capacidad de retener agua, su grado de saturación, su porosidad, la geometría y dimensiones de los cauces, etc. Son un conjunto de características que van a definir aquellas áreas susceptibles de sufrir inundaciones.

Los puntos afectados, localizados mediante el trabajo de campo y la consulta a los habitantes de la zona, se indican en el *Anexo 2: Inventario de Puntos*, afectando tanto a los asentamientos de la población y sus bienes (casas, cultivos, ganado, pozos, lavaderos,…), como a infraestructuras de desagüe (puentes, tubos,…) y vías de comunicación.

8.1.1. Escorrentía superficial no canalizada

La amenaza que supone la escorrentía superficial no canalizada, entendiéndose como el agua que escurre por las laderas después de una lluvia, se basa en las condiciones geológicas (baja permeabilidad), en las características morfológicas de las vertientes (altas pendientes) y al uso del suelo en las mismas.

En el momento de la precipitación, el agua llega a la superficie de la ladera y escurre a favor de pendiente hasta acceder a los cauces, denominándose este proceso escorrentía. Es en ese recorrido donde se presenta como una amenaza al concentrarse de forma imprevisible y erosionando el suelo desprotegido a su paso.

El papel de la vegetación sobre la escorrentía es fundamental a la hora de disminuir las aportaciones de superficie (escorrentía superficial) y aumentar las subterráneas, o lo que es lo mismo, disminuir la erosión del suelo y aumentar la capacidad de los acuíferos.

Es aquí donde las masas forestales tienen eficacia al conjugarse distintos factores para conseguir este efecto:

- La mayor capacidad de infiltración de que dotan a los suelos.
- La intercepción de la precipitación.
- La mayor rugosidad de la superficie y los mayores obstáculos del contorno, que producen una fuerte disminución de la velocidad de desplazamiento de las aguas superficiales (la cuarta parte de la velocidad en suelo raso, lo que implica un retraso importante en el tiempo de concentración en los cauces, disminuyendo no solo el caudal punta de la descarga, sino también su volumen, por la mayor posibilidad de infiltración y evaporación que supone este retraso).
- La transpiración de las plantas, que regula la dosis de humedad del suelo manteniendo una capacidad de almacenamiento disponible aun en épocas de gran humedad.
- La gran capacidad de absorción de agua de las cubiertas de restos vegetales y húmicas, que retrasa el punto de encharcamiento y, por tanto, el comienzo del flujo superficial.

En el municipio se ha producido una deforestación en relativamente pocos años para ganar superficie de cultivo temporal en zonas de pendiente, sin la ejecución correspondiente de obras de conservación de suelos *(fotografía 8.1).* Esto ha dejado las laderas desprotegidas ante el impacto de la lluvia, disminuyendo la infiltración y por tanto aumentando la escorrentía, que tiene camino libre para fluir y erosionar, alcanzando importantes velocidades, favorecidas por las altas pendientes.

Fotografía 8.1.- Erosión en regueros en ladera cultivada de La Ringlera

Y es también en la erosión donde la cubierta vegetal se presenta como un agente extraordinariamente eficaz:

- en la disipación de la energía cinética de las gotas de lluvia,
- en el aumento de materia orgánica y su consecuente resistencia al transporte,
- en el aumento de la rugosidad superficial limitando la velocidad del flujo,
- y como limitante de la progresión en anchura y en profundidad de los regueros.

Con todo esto vemos como las precipitaciones, sin llegar a ser muy intensas, causan por si solas una fuerte erosión del suelo, además de favorecer la incisión y ensanchamiento de regueros y quebradas. Esto provoca una situación en la que la concentración del flujo se hace de forma espontánea e imprevisible, afectando a toda actividad humana asentada en las vertientes de las quebradas.

8.1.2. Avenidas e inundaciones asociadas a los ríos y quebradas

Las características morfológicas de la red de drenaje en el municipio de Jucuarán hacen que se tomen todas las subcuencas como torrenciales por presentar: pendientes fuertes e irregulares; márgenes rápidamente variables; y deforestación de sus vertientes. Desde el punto de vista hidrológico, sus características son también de carácter torrencial denotándose por: caudal rápidamente variable tanto en crecidas como en decrecidas; flujos rápidos, turbulentos y cargados de materiales diversos; transporte en masa; y funcionamiento marcado por la importancia de episodios excepcionales con elevado caudal como el Mitch *(fotografía 8.2)*

Fotografía 8.2.- Lugareño marcando la altura de la avenida del huracán Mitch en la Qda. El Cacao.

Dentro del complejo red de drenaje, entendido como la escorrentía superficial concentrada y jerarquizada en cauces, podemos diferenciar dos amenazas según nos encontremos en las partes bajas o de desembocadura, o en cualquier punto del cauce (parte alta y media) donde sus características morfológicas y de uso permitan el desbordamiento.

Parte alta y media

Las condiciones en que nos encontramos las quebradas en las partes alta y media son de valles profundos (hasta 350m), con pendientes elevadas (entre el 7% y el 30%), gran cantidad de material depositado en el lecho de los cauces *(fotografía 8.3)* y cambios bruscos de dirección debidos al fuerte control estructural de la zona.

Fotografía 8.3.- Material depositado en la parte alta del Río El Convento.

Como se pudo comprobar en los recorridos de campo, muchos de los puntos donde la quebrada sufre estos cambios de dirección fueron inundados con la avenida del Mitch al sobrepasarse el talud y por tanto la capacidad soportable del cauce. La superficie regada varía dependiendo de las condiciones morfológicas del punto (altura de talud, pendiente de las vertientes, rellanos en el fondo de valle,…), de la cantidad y fuerza del agua, del material de carga que lleve el flujo, de los obstáculos naturales o antrópicos que se encuentren, etc.

Por tanto, se consideran estas partes como zonas de precaución por su potencialidad a concentrar agua y a incrementar el volumen de la corriente con el material sólido del cauce; aumentando el flujo de forma muy rápida su velocidad y fuerza erosiva pudiendo desbordar fuera de la superficie del cauce.

Partes bajas o de desembocadura

En las partes bajas de las quebradas analizadas se ha visto una gran cantidad de material acumulado en el cauce proveniente de la avenida del huracán Mitch. Éste acarreó y depositó sedimentos correspondientes a la carga de lavado y a la carga de materiales del lecho. La carga de lavado se debe fundamentalmente a los procesos de erosión laminar y en regueros en las vertientes de las subcuencas, originados por la acción de las escorrentías superficiales. La segunda, carga de materiales del lecho, es producida por la acción sobre el contorno de la tensión tractiva de las aguas encauzadas de esas escorrentías, es decir, el resultado de la fuerza con que actúa el flujo de agua concentrado en el cauce.

Además de este evento, los terremotos del 2001 desencadenaron fenómenos de inestabilidad de laderas con su consiguiente aporte de material al cauce.

La suma de estos fenómenos naturales han modificado las condiciones de flujo de las quebradas en los 5 años posteriores a la avenida del Mitch, teniendo que adaptarse a las nuevas características: ensanchamiento de los cauces, nuevos depósitos en su recorrido,

material de mayor tamaño, etc. Esto provoca una migración de la escorrentía hacia lugares más favorables para su recorrido, acentuándose este hecho en las zonas con escasa pendiente *(fotografía 8.4)*

Fotografía 8.4.- Depósitos después de la migración del cauce a nuevas zonas. Qda. La Palanca (Agua Fría).

En este sentido, cabe recordar que toda actividad erosiva de un sistema de drenaje depende del nivel base, línea imaginaria que tiende a equilibrar el perfil del cauce con el nivel general o nivel de los océanos. El nivel de base, por pérdida de suficiente pendiente, queda por encima de la superficie terrestre, provocando que cese la erosión y el transporte de carga sólida del caudal. A partir de este cambio brusco de pendiente, los caudales de las quebradas, pierden su capacidad de erosión y pasan a depositar los materiales que transportan. Este hecho provoca un ensanchamiento de los cauces en estos puntos, que a la vez propicia una disminución de la velocidad y de la capacidad de arrastre de carga sólida por el aumento de la fuerza de rozamiento que se opone a la energía del flujo, dando lugar a zonas extensas de deposición.

Fotografía 8.5.- Zona de cultivo arrasada por material dejado en la avenida del huracán Mitch. Parte baja Río El Convento.

El efecto combinado de estos factores, conlleva una disminución de la energía del flujo y una tendencia a la sedimentación en las zonas llanas donde se ubican la mayoría de actividades del hombre (vivienda, cultivo, etc). *(fotografía 8.5)*

Y es en estos puntos donde ocurren los desbordamientos. Éstos pueden producirse por varias causas y de maneras diferentes. Una de las causas de desbordamiento puede venir dada por una capacidad insuficiente del cauce, dando lugar a la ocupación de áreas más amplias por parte del caudal sobrante. Otra de las causas puede ser la obstrucción del cauce por deposición de materiales, dando lugar a un desvío del flujo.

Fotografía 8.6.- Vista de material aluvial en los conos de deyección. Excavado por la Qda. El Jutal en su parte baja.

Es importante mencionar la existencia de una unidad geomorfológica al pie de las quebradas: los

conos de deyección. Estas son estructuras a priori potencialmente inundables. Según se explica en *"La inundación torrencial catastrófica del camping "Las Nieves" del 17 de Agosto de 1996 en el cono de deyección del Arás" (Ayala-Carcecdo, F.J. Bisecas, Pirineo Aragonés)*: "La carga del torrente comienza a deposita rse al producirse la caída de pendiente, bien en la parte final del torrente, bien en el ápice del cono, taponando su propio cauce y acabando por abrir otro nuevo tras desbordarse como una inundación en manta no confinada (sheet-flood). Esta característica estructural migratoria del cauce en los conos de deyección, tiene gran importancia con vistas a la delimitación de zonas inundables. Dado que no puede garantizarse que con lluvias menores de un periodo de retorno de 500 años no existe migración del cauce, y que ésta puede producirse casi en cualquier dirección, la conclusión inmediata es: **todo el cono de deyección es zona potencialmente inundable**".

Con esto resaltamos la importancia de identificar estas unidades geomorfológicas con el fin de restringir el uso del suelo a determinadas actividades. *(fotografía 8.6)*

Tras el desbordamiento pueden darse dos situaciones en función del caudal implicado y de la energía de éste:

- fenómenos de arroyada en manto, donde la avenida se tiende regando grandes extensiones;
- que el flujo se canalice rápidamente en otros canales, ya definidos, que constituirían líneas preferenciales de flujo.

En las quebradas visitadas se ha observado la combinación de ambos fenómenos:
Por un lado, los cauces se encuentran limitados por laderas con pendientes superiores al 30% en toda la parte alta y media del recorrido, hasta la parte baja, donde se pierde el encajamiento y por tanto las barreras físicas que canalizan las aguas. Es en este punto donde el fenómeno de arroyada en manto cobra especial importancia al tener las condiciones físicas propicias para regar grandes extensiones de terreno. Por otro lado, esas mismas aguas toman en determinados puntos direcciones de flujo preferentes, provocando la migración del cauce por espacios destinados a actividades humanas, principalmente cultivos.

8.2. Mapa de áreas inundables

Como se ha venido explicando, la avenida del huracán Mitch, por su impacto y cercanía en el tiempo, ha servido de referencia para identificar las características de una inundación de gran magnitud, constatando como afectó tanto a la morfología de las vertientes, como a la población y sus infraestructuras. De igual forma se ha visto claramente la importancia del uso del suelo a la hora de controlar la escorrentía superficial no canalizada y su daño potencial, así como la acusada remodelación de los cursos de agua en

cuanto a sus características intrínsecas (profundidad, acumulación de material, anchura, etc,…) y su consecuente readaptación a las nuevas condiciones de flujo.

Con la finalidad de relacionar las zonas del mapa de inundaciones con la magnitud de las amenazas se van a determinar diferentes escenarios. Para esto, lo primero es evaluar los factores desencadenantes de avenidas e inundaciones, donde podemos decir que son los terremotos (por el aporte de material al cauce) y principalmente el régimen de precipitaciones los que van a determinar la ocurrencia o no de la amenaza.

Centrándonos primero en las precipitaciones, será la escorrentía generada en el aguacero la que con su fuerza de erosión y arrastre mueva gran cantidad de material, haciendo que el flujo sea cada vez más concentrado y por tanto aumente su volumen y su capacidad de desbordamiento e inundación. El material susceptible de ser arrastrado procede de la carga de lavado y de la carga del lecho *(ver apartado 8.1.2: partes bajas o de desembocadura)*, sin olvidarnos de que la sismicidad repercute directamente en los aportes al cauce y sus inmediaciones.

Aún así, la sismicidad no se ha evaluado en el presente estudio como factor desencadenante a la hora de establecer escenarios. Esto no quiere decir que no se deba tener en cuenta en futuros aportes al cauce, ya que en el municipio como en todo el país el riesgo sísmico no es una probabilidad es una certeza, donde los aportes por inestabilidades son de igual forma una certeza. El motivo es que el peso de las condiciones intrínsecas de la red de drenaje y las subcuencas, sumado a la importancia del régimen de precipitaciones (acumulado e intensidad), hace que el parámetro sísmico tenga menos relevancia en la situación actual.

8.2.1. Determinación de los escenarios

Como se decía, se han determinado diferentes escenarios con la finalidad de relacionar las magnitudes de las amenazas con las zonificaciones del mapa de inundaciones. Para cada escenario, se determina la magnitud de la amenaza con respecto a la intensidad de las precipitaciones.

Esta diferenciación tiene relación con las condiciones del terreno respecto al contenido en agua, por tanto, a la estación o periodo de lluvias en que nos encontremos, ya sea en el ciclo anual, o a mayor escala en el ciclo global de la zona *(ver apartado 4.1.3)*

Dentro del ciclo anual son las condiciones del terreno respecto al contenido en agua, que ahora pasamos a explicar, las que van a influir directamente en la amenaza a inundaciones y avenidas:

Suelo no saturado. Se considera condición de suelo no saturado la mayor capacidad de almacenaje de agua de infiltración que en suelo saturado. Estas condiciones se dan principalmente en la considerada estación seca. Sin embargo, debe tenerse especialmente precaución si las condiciones de sequedad han sido extremas. Para condiciones de suelo totalmente seco, Según *López Cadenas y Mintegui (1986),* " ante

cualquier aguacero, inicialmente, la capacidad de infiltración es alta, pero en poco tiempo sufre un descenso rápido debido al efecto combinado de una serie de factores: La compactación de la superficie por el impacto de las gotas, el taponamiento de huecos por las partículas terrosas que transporta el agua al escurrir por la superficie, el cierre de las grietas superficiales y el incremento del contenido de humedad del suelo que lleva consigo una notable reducción de las fuerzas capilares cuya succión hace descender las aguas".

Suelo saturado. En condiciones donde el suelo ha superado su capacidad de almacenaje, se genera un importante escurrimiento. Es una situación habitual a finales de la estación lluviosa donde pueden producirse situaciones especiales de circulación transitoria de aire tropical con la formación y entrada de fenómenos ciclónicos generados en el mar Caribe, que pueden dar lugar a lluvias intensas durante varios días, como fue el caso del huracán Mitch. En estas épocas el suelo está saturado en extremo y cada pequeño aguacero, aún sin ser torrencial, produce importantes ondas de avenidas. En estos tipos de aguacero también pueden generarse inestabilidades y consecuentemente posibles modificaciones y/o problemáticas en la dinámica de ríos y quebradas.

De igual forma, la amenaza va a depender en gran parte de las características de la estación lluviosa que imperen cada año, enmarcadas dentro del ciclo global de la zona. Para simplificar las condiciones, entendemos por:

- Invierno seco: aquel en el que la precipitación total anual es menor de 1600 mm y en el que la relación entre intensidad horaria y diaria de las precipitaciones es baja, es decir, las precipitaciones se distribuyen uniformemente en el tiempo, sin dar lugar a fuertes tormentas. Si las intensidades en un invierno seco fueran altas, la amenaza considerada bajo estas circunstancias aumentaría de grado. El efecto de "El Niño" y "La Niña", ocasiona un retraso en la aparición de la estación lluviosa pero un elevado registro de precipitaciones respecto a las medias anuales, por lo que la apariencia de un invierno seco puede traducirse en tormentas tropicales concentradas en pocos meses. El efecto de sequía ocasionado por el retraso en la aparición de las lluvias ocasiona importantes volúmenes de agua en forma de escorrentía superficial ocasionando un aumento del grado de amenaza.

- Invierno normal: aquel en el que la precipitación total anual ronda los 1.600 mm y en los que las intensidades de las precipitaciones son de moderadas a altas. En estos escenarios, la capacidad de infiltración del suelo disminuye a medida que avanza la estación, generando volúmenes de escorrentía cada vez más elevados.

- Invierno copioso: aquel en el que la precipitación total anual es mayor de 1900 mm y en los que las precipitaciones se distribuyen con elevadas intensidades. La acumulación de las sucesivas lluvias sumado a las elevadas intensidades da lugar a un terreno donde la capacidad de infiltración puede ser poca o nula, por tanto, se genera un volumen de escorrentía similar a la cantidad de agua precipitada. La formación de huracanes, característico de los climas tropicales, coincide con el primer máximo de precipitaciones, en junio, y dura hasta finales de noviembre. La ocurrencia de huracanes no sigue un patrón fijo, por lo que se puede esperar a lo

largo de toda la temporada. La amenaza de estos fenómenos se intensifica si se presentan a finales de la estación lluviosa.

A la hora de establecer los escenarios se considera como condición inicial y primer escenario el comienzo de la estación lluviosa, de tal forma que según vayan ocurriendo las precipitaciones se sumen los valores de lluvia diaria hasta llegar a un valor dado (valor 1), a partir del cual entramos en el segundo escenario. Éste tendrá unos valores mínimo y máximo de lluvia acumulada, coincidiendo el mínimo con el límite del primer escenario. El valor máximo (valor 2) será aquel que una vez superado entremos en el tercer escenario, indicando los valores de lluvia acumulada más elevados.

Para determinar el valor 1 nos basamos en la precipitación media de la estación de Jucuarán, considerada en **1600 mm**. El valor 2 se ha establecido comparando las precipitaciones de dicha estación con los de la Hcda. El Cañal para el huracán Mitch, y con los de este año (2003) recogidos en los pluviómetros instalados en el municipio. Con esto se considera un valor umbral de **1900 mm.**

Por otro lado, dentro de cada escenario, se determina la magnitud de la amenaza respecto a la intensidad de las precipitaciones. Diferenciamos tres valores: intensidad baja, media y alta. Para poder establecer estos límites se relacionan precipitación y tiempo de manera que se conozca cuanto duran dichas lluvias. La ausencia de un pluviógrafo, o de personas con disponibilidad para tomar esos datos, hace imposible determinar los umbrales de intensidad, aunque sirviéndonos de aproximación y sin tener en cuenta la duración de la lluvia establecemos:

- **Intensidad baja: precipitaciones inferiores a 60 mm/h**.
- **Intensidad media: precipitaciones superiores a 60 mm/h e inferiores a 120 mm/h**.
- **Intensidad alta: precipitaciones superiores a 120 mm/h**.

La amenaza se ha dividido en: **Baja (B)**, **Media (M)**, **Alta (A)** y **Muy Alta (MA)**, en función de la magnitud de los eventos, que van a depender del volumen de caudal líquido y carga sólida asociada.

Escenarios	Intensidad de precipitaciones	Grado de amenaza			
		B	M	A	MA
p < 1600 mm	BAJA				
	MEDIA				
	ALTA				
1600 mm > p < 1900 mm	BAJA				
	MEDIA				
	ALTA				
p > 1900 mm	BAJA				
	MEDIA				
	ALTA				

Figura 8.1.- Relación entre escenarios y grado de amenaza que pueden presentarse dependientes de la magnitud de la amenaza.

8.2.2. Realización del mapa

El mapa de áreas inundables *(ver Anexo 1: Mapas; "Areas Inundables")* ha sido elaborado con el objetivo de caracterizar esta amenaza. Se ha tenido en cuenta la información facilitada por los habitantes de las comunidades en los que se ha realizado el estudio (información no siempre precisa en cuanto a la magnitud de los procesos), observaciones de campo, fotografía aérea (escala 1: 20.000; años 1963, 1988, 1989) y el mapa topográfico (escala 1: 25.000). Por tanto la metodología empleada para el análisis en cada quebrada ha variado en función de las características de las mismas y de la disponibilidad de datos facilitados por la población.

Se han hecho recorridos por las quebradas principales, las cuales fueron caracterizadas en el *capítulo 5*, y por las que los habitantes de la zona nos indicaban problemas de desbordamientos y avenidas, principalmente la del huracán Mitch. Con los datos recopilados se ha extrapolado al resto de las subcuencas con el fin de caracterizar toda la zona y evaluar en conjunto la dinámica evolutiva del municipio. De igual forma se obtuvo información de puntos críticos donde, a escala más pequeña, el problema asociado a la dinámica de la red de drenaje incide en la vida cotidiana de la población, como pueden ser cortes de carreteras, soterramiento de pozos y manantiales, etc.*(ver Anexo 2: Inventario; "Puntos Críticos")*

La amplitud de las zonas potencialmente inundables depende del grado de desarrollo de las quebradas asociadas, en cuanto a sus dimensiones y morfología.

Un mayor desarrollo de la cuenca implica una mayor capacidad de captación de agua y mayor aporte de materiales que pueden incorporarse al flujo hídrico como carga sólida.

En las desembocaduras de las quebradas El Zúngano, El Barrillal, El Cacao, El Jutal, Seca, El Chorro y La Bocanita se ha encontrado una característica común, la existencia de una misma unidad geomorfológica al pie de las quebradas: los conos de deyección *(ver apartado 8.1.2: partes bajas o de desembocadura)*

En el resto de quebradas no aparece una unidad geomorfológica definida, pero ciertas observaciones de campo hacen que, aun no estando definido un cono de deyección, la dinámica de las aguas sea similar. C aparecen en toda tes medias de *8.9 y 8.10)* Éstos s actuales, de la dinámica de s de ser una pr no son permane e se deben to cionamiento.

Fotografía 8.7.- Depósitos aluviales en la parte media de la Qda. Samuria (Río la

Fotografía 8.8.- Depósitos aluviales en la parte media de la Qda. Cerro Azul (Río El Convento).

Fotografía 8.9.- Depósito aluvial en la parte baja de la Qda. El Embogue

Fotografía 8.10.- Depósito aluvial en la parte media de Qda. Seca.

Área inundable 1

Este área se corresponde con la escorrentía superficial no canalizada, basada en las zonas con una pendiente superior al 30% *(ver apartado 8.1.1).* Esto limita una superficie de gran extensión en la que las precipitaciones, sin llegar a ser muy intensas, causan por si solas una fuerte erosión del suelo, además de favorecer la incisión y ensanchamiento de regueros y quebradas. Provoca una situación en la que la concentración del flujo se hace de forma espontánea e imprevisible, afectando a toda actividad humana

asentada en las vertientes de las quebradas. Este proceso se ve favorecido por la deforestación y por prácticas de cultivo sin obras de conservación de suelos.

Las condiciones asociadas a este área serían:

-Precipitaciones acumuladas inferiores a 1600 mm e intensidad de la precipitación alta.

-Precipitaciones acumuladas entre 1600 mm y 1900 mm e intensidad de la precipitación media.

-Precipitaciones acumuladas mayores de 1900 mm e intensidad de la precipitación baja.

EN ESTOS CASOS EL GRADO DE AMENAZA SERÍA MEDIO.

Área inundable2

Los límites para este área se corresponden con la superficie inundada en la avenida del huracán Mitch. Se establecieron tras la recogida de puntos en campo para luego extrapolar con el análisis de fotografía aérea y mapa topográfico. Elegimos este evento por su magnitud e impacto en la zona, así como por identificarlo como representativo de una gran avenida torrencial.

También se incluye en este área la superficie del cauce en el que la alta concentración de la escorrentía, o bien modificó sus características morfológicas (anchura, profundidad), o simplemente lo hizo desbordar depositando materiales de tamaños diversos. Para establecer los límites, se comprobó, mediante los recorridos de campo, hasta donde afectó la avenida del Mitch identificando depósitos recientes y consultando a los habitantes de zonas cercanas. Para poder extrapolar a toda la red de drenaje se interpretaron las condiciones morfológicas de los puntos visitados mediante fotografía aérea y mapa topográfico. De esta forma resultaron superficies mojadas de 20m y 10m, dependiendo de las características de cada cauce *(ver apartado 8.1.2: parte alta y media).*

Las condiciones asociadas a este área serían:

-Precipitaciones acumuladas entre 1600 mm y 1900 mm e intensidad de la precipitación alta.

-Precipitaciones acumuladas mayores de 1900 mm e intensidad de la precipitación media.

EN ESTOS CASOS EL GRADO DE AMENAZA SERÍA ALTO.

Área inundable 3

Como se explica en este capítulo, la existencia de conos de deyección y de morfologías con similar comportamiento en las desembocaduras de las quebradas, hacen que ante una avenida sea impredecible determinar el recorrido del flujo.

Con esta premisa, y mediante fotointerpretación y contraste con el mapa topográfico, se pone límite a este área de posible afectación.

Será una zona, topográficamente baja, que en una avenida de grandes dimensiones podría ser inundada.

La condición asociada a este área sería:

-Precipitaciones acumuladas mayores de 1900 mm e intensidad de la precipitación alta.

EN ESTE CASO EL GRADO DE AMENAZA SERÍA MUY ALTO.

Como conclusión, debemos remarcar que nos encontramos ante unas quebradas en proceso de evolución, con una gran cantidad de material susceptible de ser transportado y en un clima en el que los procesos meteorológicos se caracterizan por la intensidad con que se manifiestan, generando procesos torrenciales que pueden alcanzar una gran envergadura y en consecuencia con un peligro asociado que puede extenderse, para las quebradas de estudio, a toda la superficie del cono de deyección.

De igual manera y como ya se ha indicado, no debe olvidarse que todas las zonas próximas a todo tipo de quebradas son áreas con un peligro potencial y que es importante realizar un seguimiento de la evolución de las mismas, así como mantener el cauce en unas condiciones óptimas para mitigar, en la medida de lo posible, los efectos de esta amenaza.

8.3. Análisis probabilístico de ocurrencia de precipitaciones

Con objeto de estimar la probabilidad de ocurrencia de lluvias que puedan desencadenar amenazas naturales en la zona de estudio, se han analizado estadísticamente las series de precipitaciones máximas diarias anuales, únicos datos disponibles y que pueden proporcionar información en este tipo de fenómenos.

Para realizar un análisis estadístico se requiere que la serie posea una extensión mínima, considerándose ésta del orden de 20 años de registro, con el objeto de que los datos

obtenidos sean lo más precisos posible *(Ferrer, 1993, Ferrer y Ardiles, 1995).* Para el municipio de Jucuarán sólo se han encontrado registros en series continuas en un intervalo de 13 años (1969-1981) con el inconveniente añadido de que son incompletas. Este es uno de los motivos por el que haremos hincapié en la importancia de la toma de datos pluviométricos en este municipio.

A partir de la función de distribución de Gumbel se han obtenido los cuantiles (periodos de retorno T) correspondientes a las precipitaciones máximas diarias. La distribución de Gumbel obtiene buenos resultados para el estudio de frecuencias de valores extremos. Se han calculado las precipitaciones tipo para diferentes periodos de retorno, que se reflejan la siguiente tabla:

PRECIPITACIÓN TIPO (mm)	PERIODO DE RETORNO (años)
151.0	2
209.8	5
248.7	10
297.9	25
334.4	50
370.6	100
406.7	200
454.3	500

Tabla 8.1.- Periodo de retorno de las diferentes precipitaciones.

Según la observación de las distribuciones probabilísticas de otros estudios realizados, la función de distribución Gumbel refleja mal los periodos de retorno a partir de los 25 años infravalorando los resultados de las precipitaciones, por lo que cabría esperar precipitaciones más intensas. Las funciones que mejor reflejan estos eventos extraordinarios sin amplificar el periodo de retorno son GEV y SQRT-ET máx., sin que se hayan podido desarrollar en este estudio.

El periodo de retorno, que indica la probabilidad de que se produzca una lluvia mayor a esa magnitud dada en un día del año, se interpreta de la siguiente forma:

Periodo de retorno	Precipitación (mm)	Probabilidad de que se produzca una lluvia mayor de esa magnitud (mm) en un día del año
2 años	151.0	50%
5 años	209.8	20%
10 años	248.7	10%
25 años	297.9	4%
50 años	334.4	2%
100 años	370.6	1%
200 años	406.7	0.50%
500 años	454.3	0.20%

Tabla 8.2.- Interpretación de los periodos de retorno en porcentajes anuales.

Estos resultados, comparados con los obtenidos en trabajos cercanos a Jucuarán, como son los realizados en el volcán de San Miguel y en el volcán de Usulután, muestran

valores similares de precipitación. En el estudio de San Miguel se obtuvieron valores cercanos a 140 mm y en el de Usulután cercanos a 130 mm, refiriéndonos al periodo de retorno de 2 años. Esta diferencia puede tener origen en la situación geográfica y topográfica de las estaciones, así como en la baja representatividad de los datos del municipio de Jucuarán.

En este sentido se han instalado tres pluviómetros repartidos en diferentes zonas del municipio con el fin de continuar con la toma de datos que finalizó en 1981. Su situación y coordenadas UTM quedan recogidas en la *tabla 8.3.*

Estaciones	Responsables de la toma de datos	m.s.n.m	Coordenadas	
			Latitud Norte	Longitud Este
Jutal	Fidel Angel Segovia	442	1466970	364402
Jucuarán	Nelson Argueta	581	1464267	365019
La Ringlera	Eusebio Juárez y Antonio Escobar	101	1459344	360231

Tabla 8.3.- Pluviómetros instalados en el municipio.

Para llevar el registro diario de cada uno de los pluviómetros se ha capacitado a tres personas voluntarias, así como al resto de los componentes de los comités, con el fin de que sea la propia comunidad la que se involucre en el conocimiento de su medio y así poder actuar en consecuencia. Las personas voluntarias y los pluviómetros aparecen en el *Anexo 4: Análisis de Inundaciones.*

Como parte del seguimiento técnico que se espera dar en años consecutivos, se propondrá al SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales) la unificación de estos pluviómetros en su red pluviométrica nacional, previa comprobación de esta entidad gubernamental.

Análisis de datos pluviométricos actuales

Como hemos dicho, con el fin de continuar con el registro y empezar a conocer las precipitaciones características en el municipio, se instalaron tres pluviómetros repartidos en el norte, centro y sur de Jucuarán, además de buscar otras entidades que llevaran ese control.

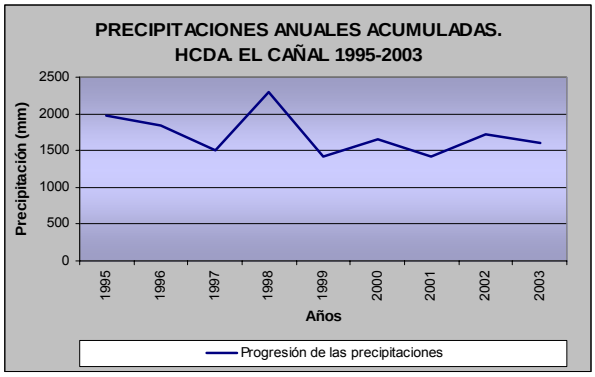


Figura 8.2.- Precipitaciones anuales acumuladas de la Hcda. El Cañal. (1995 – 2003)

Con registro desde 1995 hasta la actualidad encontramos la Hcda. El Cañal, de la cual ya teníamos datos desde 1970 a 1981. En las *figuras 8.2 y 8.3* se muestra como las precipitaciones mantienen una ciclicidad en el tiempo, tanto en los

valores máximos diarios anuales como en los acumulados anuales.

Para el año 1998, fecha en la que ocurrió el huracán Mitch, observamos un pico en la *figura 8.2* con un total de 2295mm acumulados, para luego oscilar entre los 1500 y 1700mm en años posteriores. Ese mismo año, la precipitación máxima diaria llegó a 200mm el 31 de octubre, siendo el pico de la *figura 8.3* el año anterior, con 223mm. Con esto parece que la causa de las grandes avenidas torrenciales e inundaciones acontecidas ese año se encuentra en la combinación de los dos factores:

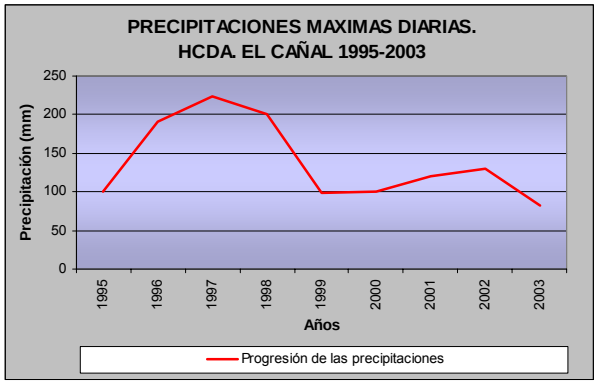


Figura 8.3.- Precipitaciones máximas diarias de la Hcda. El Cañal. (1995 – 2003)

- Elevada acumulación de las precipitaciones (finales de invierno).
- Altas intensidades.

Comparando los registros de precipitación más altos de los tres pluviómetros instalados en el municipio *(figura 8.5)* con los obtenidos en 1998 en la Hcda. El Cañal *(figura 8.4)* se observan marcadas diferencias.

En la *figura 8.4* vemos como desde el mes de abril las lluvias acumuladas se fueron incrementando progresivamente hasta agosto, donde sufre una caída pasando de 400mm a 200mm, para luego subir bruscamente en octubre hasta los 800mm, coincidiendo con el pico de las máximas lluvias diarias (200mm). Como se ha dicho, la conjunción de estos factores desencadeno una elevada concentración de la escorrentía en las subcuencas cuyos cauces no pudieron soportar.

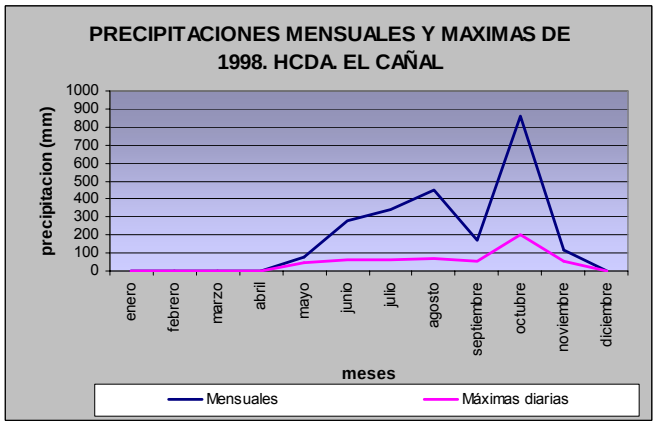


Figura 8.4.- Precipitaciones mensuales y máximas diarias de la Hcda. El

Si observamos la *figura 8.5* correspondiente a Jucuarán para el 2003 vemos

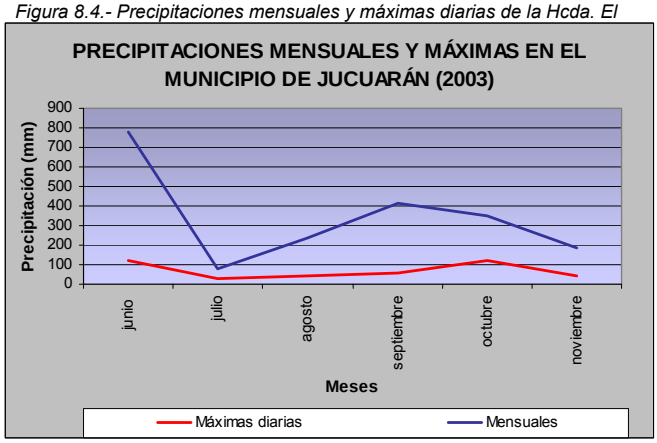


Figura 8.5.- Precipitaciones mensuales y máximas diarias del municipio de Jucuarán. (junio – noviembre, 2003)

un comportamiento diferente. En junio se alcanzan valores de 775mm, cercanos a los 800mm del caso anterior, pero con la diferencia de ocurrir al comienzo del invierno, donde el suelo no se encuentra saturado y es capaz de retener más agua. Luego se observa una bajada en julio hasta los 80mm, para subir en septiembre hasta los 400mm. Termina el año con una nueva disminución de las precipitaciones hasta 188mm, teniendo en cuenta que la toma de datos incluidos en esta memoria finalizó el 12 de septiembre y las posteriores lluvias no han sido analizadas aunque continúe su registro.

Con estas comparativas se intentan encontrar patrones pluviométricos similares a los de la *figura 8.4* que nos hagan predecir estados de alerta o precaución, teniendo en cuenta a la hora de establecer un umbral las condiciones de saturación del suelo. Para ello es necesario continuar con la toma de datos en las estaciones implantadas en el municipio y procesarlos mensualmente, además de contrastar los resultados con los caudales que bajan por las quebradas *(ver apartado 8.4.5)*

8.4. Estudio hidrometeorológico

Con el presente estudio hidrometeorológico se pretende determinar los posibles niveles que pudieran alcanzar las aguas de las quebradas para diversos períodos de retorno. Es decir, estimar con que frecuencia podemos tener caudales que den lugar a desbordamientos en algún punto de la quebrada. Para llegar a conocer este dato, es necesario obtener primero los caudales máximos correspondientes a dichos períodos de retorno, y luego calcular la capacidad soportable de los cauces o estructuras como puentes y drenajes en general.

Para la estimación de los caudales se han utilizado datos pluviométricos, en concreto el parámetro P_d (precipitación máxima diaria) obtenido de estaciones cercanas al municipio. Para un mejor análisis sería conveniente utilizar datos de estaciones de aforo donde se obtiene directamente el caudal en un punto determinado. Al no contar con estos registros en la zona, se transforma la precipitación máxima diaria en intensidades y determinando el coeficiente de escorrentía a partir de los datos físicos de la cuenca, podemos determinar el caudal asociado a los periodos de retorno establecidos.

Este método de obtención de caudales considera que la mayor parte de las aguas encauzadas provienen de la escorrentía directa de las precipitaciones, sin tener en cuenta los aportes de aguas subterráneas.

Por otro lado, las intensidades se calculan de acuerdo a las precipitaciones máximas diarias, sin que se cuente con datos reales de intensidad horaria, o lo que es lo mismo, sin que se sepa la relación real entre precipitación y tiempo de ocurrencia (cuanto dura una lluvia de

unos determinados mm). Para obtener esta información sería necesario instalar un pluviógrafo en la zona de estudio, donde se registraría no sólo la cantidad de lluvia caída sino cuanto duró la precipitación.

Conociendo la intensidad real y los caudales en la estación de aforo se puede estudiar de manera más eficaz el comportamiento de las avenidas torrenciales. Aún así, habría que sumar al caudal líquido la carga sólida desplazada en el flujo, para obtener el volumen total de la avenida y la capacidad de cauce que sería imprescindible tener para no verse desbordado.

Dentro de nuestro estudio hidrometeorológico se han desarrollado las siguientes fases:

- Delimitación y caracterización de las subcuencas.
- Calculo del tiempo de concentración.
- Calculo de la intensidad de lluvia.
- Determinación del coeficiente de escorrentía.
- Determinación de los caudales asociados a un periodo de retorno concreto.
- Estimación del caudal máximo soportable.

8.4.1. Límites y características de las subcuencas

Como ya se dijo en el *apartado 5.1*, de las subcuencas existentes se han tomado seis de ellas representativas de toda la zona para su estudio detallado teniendo en cuenta que el comportamiento del resto puede ser similar, y así poder extrapolar los resultados finales a todo el municipio. Éstas se encuentran repartidas en todo el área de estudio de la siguiente forma: Qda. El Jutal y Qda. El Colorado en el norte, Qda. El Emboque en el sureste, Qda. Salamar en el sur y Río El Convento y Río La Ringlera en el suroeste; todas ellas con la cabecera en la zona central del municipio, que a su vez presenta las cotas más altas.

La delimitación de las mismas se ha hecho mediante SIG a escala 1:25.000. En el *Anexo 1: Mapas; "Red de Drenaje y Subcuencas"* están detallados los límites de las cuencas, y en el *Anexo 4: Análisis de Inundaciones; "Características Físicas de las Subcuencas"* otros factores físicos condicionantes para el análisis de peligrosidad por inundación (área de la cuenca, longitud del cauce principal, desnivel máximo, etc).

8.4.2. Tiempo de concentración

Uno de los factores fundamentales que influyen de forma decisiva en el proceso de inundación es el tiempo de concentración, T_c. Se define como el tiempo transcurrido desde que cae una gota de agua en el punto más alejado de la cuenca, hasta que llega a la salida

de ésta. Este tiempo es función de la configuración geográfica y topográfica de la zona e independiente de las características y magnitudes del aguacero.

Su utilidad e importancia radica en que será el intervalo de duración de un aguacero para calcular su intensidad, según la metodología expuesta por *Témez*, y por tanto influirá directamente en el cálculo final de los caudales. Visto de otra forma, para tiempos de concentración de una determinada duración se asume que la precipitación transcurre en ese espacio de tiempo, y éste será el que podríamos llamar tiempo de reacción, entendido como aquél que transcurre hasta acumularse el máximo caudal posible y pueda desencadenar en desbordamientos.

Existen varios métodos para hallar el tiempo de concentración de una cuenca. Se han seleccionado cuatro de ellos para comparar los resultados y elegir el que mejor se adecue al desarrollo de este método:

- Según formula desarrollada para El Salvador:

$$Tc = \frac{\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$$

Tc: tiempo de concentración (horas)
A: superficie de la cuenca (km^2)
L: longitud del cauce principal (kilómetros)
H: desnivel de la cuenca (metros)

- Según Kirpich, la fórmula para el cálculo del tiempo de concentración es:

$$Tc = 0.0195\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.38}$$

Tc: tiempo de concentración (minutos)
L: longitud cauce principal (metros)
H: diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal (metros)

- Según Témez:

$$Tc = 0.3\left(\frac{L}{J^{\frac{1}{4}}}\right)^{0.76}$$

Tc: tiempo de concentración (horas)
L: longitud del cauce principal (kilómetros)
J: pendiente media del cauce principal (%)

- Según Giaudotti:

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$$

Tc: tiempo de concentración (horas)
A: superficie de la cuenca (km^2)
L: longitud del cauce principal (kilómetros)
H: desnivel de la cuenca (metros)

Los parámetros físicos para realizar los cálculos del tiempo de concentración son los que aparecen en la *tabla 8.4:*

Parámetros	***Qda. El Jutal***	***Qda. El Colorado***	***Qda. El Emboque***
Superficie de la cuenca (Km^2)	5.186	6.48	27.959
Pendiente del cauce principal (%)	12	13	7
Longitud del cauce principal (m)	6524.71	6367.92	10813.06
Desnivel de la cuenca (m)	710	730	630

Parámetros	***Qda. Salamar***	***Río La Ringlera***	***Río El Convento***
Superficie de la cuenca (Km^2)	6.502	15.226	10.7
Pendiente del cauce principal (%)	15	8	9
Longitud del cauce principal (m)	7257.74	11918.78	8612.85
Desnivel de la cuenca (m)	880	750	670

Tabla 8.4.- Parámetros físicos de las subcuencas.

Los resultados obtenidos que se muestran a continuación *(tabla 8.5)* se refieren al tiempo de concentración en las desembocaduras de los ríos y quebradas de las subcuencas seleccionadas:

Qda. El Jutal	**Tiempo de concentración**	
	En minutos	**En horas**
Salvador	34.2	0.57
Kirpich	35.4	0.59
Témez	46.2	0.77
Giaudotti	52.8	0.88

Qda. Salamar	**Tiempo de concentración**	
	En minutos	**En horas**
Salvador	33.6	0.56
Kirpich	37.2	0.62
Témez	48.0	0.8
Giaudotti	52.8	0.88

Qda. El Colorado	**Tiempo de concentración**	
	En minutos	**En horas**
Salvador	33.0	0.55
Kirpich	34.2	0.57
Témez	45.0	0.75
Giaudotti	54.6	0.91

Río La Ringlera	**Tiempo de concentración**	
	En minutos	**En horas**
Salvador	59.4	0.99
Kirpich	69.6	1.16
Témez	79.2	1.32
Giaudotti	91.2	1.52

Qda. El Emboque	**Tiempo de concentración**	
	En minutos	**En horas**
Salvador	64.2	1.07
Kirpich	66.6	1.11
Témez	75.6	1.26
Giaudotti	111.6	1.86

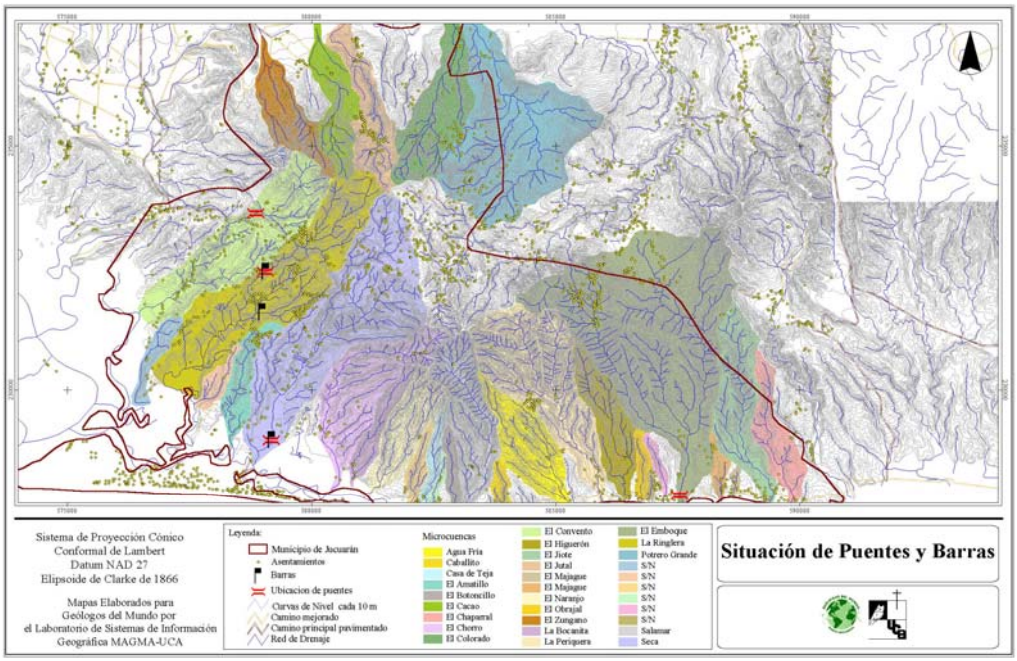
Río El Convento	**Tiempo de concentración**	
	En minutos	**En horas**
Salvador	46.8	0.78
Kirpich	49.8	0.83
Témez	60.6	1.01
Giaudotti	75.0	1.25

Tabla 8.5.- Tiempo de concentración en la desembocadura de las subcuencas.

Con esta comparativa intentamos resaltar la importancia del tratamiento de los datos para obtener los caudales finales. Se ve como en los resultados obtenidos existen grandes diferencias al utilizar una fórmula u otra. En la Qda. El Emboque, por ejemplo, aplicando por un lado la fórmula de *El Salvador* y por otro la de *Giaudotti*, obtenemos 47 minutos de diferencia. Este desfase se debe a los parámetros utilizados en la fórmula y al peso o importancia que se le da a cada uno. En el caso particular de la formula desarrollada para *El Salvador*, al tratarse de cuencas pequeñas, se elimina el valor multiplicador por 4 de área, que sí aparece en la fórmula de *Giaudotti*.

De los valores obtenidos, se escoge finalmente la fórmula de *Témez* para deducir la intensidad de lluvia en cada subcuenca para los diferentes períodos de retorno. Se utilizará ésta por seguir el desarrollo metodológico de este autor, y así introducir en la fórmula de intensidad un valor coherente con la misma.

De la misma forma, se han calculado los tiempos de concentración para cuatro de los puntos críticos situados en los puentes de diferentes quebradas. Éstos son los que mayores dimensiones presentan y pueden servir como referencia para conocer la situación de desagüe de las demás estructuras del municipio. Su situación se muestra en el *Mapa: Situación de Puentes y Barras.*



Los parámetros utilizados para calcular el tiempo de concentración en estos puntos son los siguientes *(tabla 8.6):*

Parámetros	*Qda. Las Flores*	*Qda. La Bóveda*
Longitud del cauce principal (Km)	5.48	2.94
Pendiente media del cauce principal (%)	8	8

Parámetros	*Qda. Seca*	*Qda. El Emboque*
Longitud del cauce principal (Km)	9.95	10.46
Pendiente media del cauce principal (%)	7.5	9

Tabla 8.6.- Parámetros de los cauces.

Los resultados se muestran en la *tabla 8.7*:

Qda. Las Flores (Río La Ringlera)	Tiempo de concentración	
	En minutos	En horas
Témez	43.8	0.73

Qda. Seca	Tiempo de concentración	
	En minutos	En horas
Témez	69.6	1.16

Qda. La Bóveda (Río El Convento)	Tiempo de concentración	
	En minutos	En horas
Témez	27.6	0.46

Qda. El Emboque	Tiempo de concentración	
	En minutos	En horas
Témez	70.2	1.17

Tabla 8.7.- Tiempo de concentración en los puentes seleccionados.

De los tiempos de concentración obtenidos, el valor más alto se refiere al puente de la Qda. El Emboque con 1.17 horas, y el más bajo al puente de la Qda. Las Flores con 0.73 horas. Estas diferencias tienen relación directa con los valores de los parámetros utilizados en la fórmula, más concretamente con la longitud de cauce que tomemos, ya que la pendiente presenta variaciones más pequeñas.

Para el caso de los puentes de Qda. Las Flores y Qda. La Bóveda, éstos se encuentran en la parte media de la cuenca, por lo que la distancia es menor desde el punto más alejado de la quebrada aguas arriba, y el T_c da un resultado más bajo. En cambio, los puentes de Qda. Seca y Qda. El Emboque se sitúan cerca de su desembocadura, por lo que tienen un mayor recorrido desde la parte más alejada y resulta un T_c más alto. Con esto vemos que la longitud es directamente proporcional al tiempo de concentración, por tanto, cuanto mayor distancia tomemos hasta el punto de control (en este caso los puentes), valores más altos de T_c obtendremos, lo que conllevará a obtener intensidades más bajas, como veremos en el siguiente apartado.

8.4.3. Intensidad de lluvia

La intensidad de la lluvia es uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de estudiar el funcionamiento de las avenidas torrenciales por ser uno de los principales desencadenantes, junto con el material sólido, del elevado volumen que puede alcanzar el flujo en el cauce de las quebradas.

Como se expuso en este capítulo, el medio para tomar datos de intensidad cuando ocurren las precipitaciones es un pluviógrafo. Este nos medirá la cantidad total de lluvia, y lo que es más importante, en cuanto tiempo ha caído esa lluvia.

En ausencia de un pluviógrafo en la zona, para la estimación de la intensidad de lluvia (I) en las subcuencas, se ha utilizado la metodología expuesta por *Témez (1987),* adoptando las expresiones que aparecen en dicha publicación junto con los tiempos de concentración en horas estimados con anterioridad.

Las entradas de precipitación a la cuenca se obtienen mediante el tratamiento de la información meteorológica disponible. La serie utilizada como entrada de precipitación a la cuenca refleja las precipitaciones máximas diarias recogidas en las estaciones pluviométricas. Dicha serie ya ha sido tratada estadísticamente en el *apartado 8.3* obteniendo los diferentes periodos de retorno.

Así, se tiene un valor final de precipitación en 24 horas para la cuenca y para cada periodo de retorno. Este valor debe ser convertido posteriormente a intensidad de lluvia.

La intensidad de precipitación, a utilizar en la aplicación del método racional *(apartado 8.4.5),* es la correspondiente a un determinado periodo de retorno y a un intervalo de duración que se corresponde con el tiempo de concentración.

Para su cálculo se emplea la ley de intensidad-duración que utiliza la expresión:

$$I_t/I_d = (I1/Id)^{(28\ exp0.1 - Tc\ exp0.1)\ /\ (28\ exp0.1 - 1)}$$

Esta expresión se propone como universal para cualquier curva "intensidad-duración", es decir, la curva resultante de unir puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes, todos ellos, a una misma frecuencia o período de retorno.

Esta ley, debido a su carácter adimensional, es independiente de los valores absolutos de la lluvia, lo cual permite su aplicación a cualquier período de retorno, e incluso extrapolar, eligiendo como valor de referencia el relativo a lluvia diaria:

$I_d = P_d/24$

I_d = intensidad media diaria de precipitación, correspondiente a cada periodo de retorno (mm/h).

P_d = precipitación máxima diaria, obtenida para la subcuenca y para cada uno de los periodos de retorno considerados (mm).

El cociente I1/Id, relación entre la intensidad horaria y diaria, es un parámetro característico de cada región, independiente del período de retorno. Para el área de estudio se ha estimado un valor de 11. Este valor se obtuvo relacionando los valores utilizados en la zona mediterránea de la Península Ibérica e interpolándolos para este municipio, teniendo en cuenta la torrencialidad de las precipitaciones en ambas zonas. Utilizar valores inferiores indicarían intensidades menores.

Los resultados para la desembocadura de los ríos y quebradas son los que aparecen en las *tablas 8.8 y 8.9:*

	Intensidades: It (mm/h)		
Periodos de retorno	***Qda. El Jutal***	***Qda. El Colorado***	***Qda. El Emboque***
2	78.37	79.51	58.31
5	108.90	110.47	81.02
10	129.09	130.95	96.04
25	154.63	156.86	115.04
50	173.57	176.08	129.13
100	192.38	195.16	143.13
200	211.07	214.12	157.03
500	235.87	239.28	175.48

	Intensidades: It (mm/h)		
Periodos de retorno	***Qda. Salamar***	***Río La Ringlera***	***Río El Convento***
2	76.49	56.67	66.74
5	106.28	78.75	92.73
10	125.98	93.34	109.92
25	150.91	111.81	131.67
50	169.39	125.51	147.80
100	187.75	139.11	163.82
200	205.99	152.63	179.73
500	230.19	170.56	200.85

Tabla 8.9.- Intensidad para cada periodo de retorno en Salamar, La Ringlera y El Convento.

Para los puntos críticos analizados las intensidades son *(tabla 8.10):*

	Intensidades: It (mm/h)	
Periodos de retorno	***Qda. Las Flores***	***Qda. La Bóveda***
2	86.24	112.84
5	119.83	156.80
10	142.04	185.86
25	170.14	222.64
50	190.98	249.90
100	211.68	276.99
200	232.25	303.90
500	259.53	339.60

	Intensidades: It (mm/h)	
Periodos de retorno	***Qda. Seca***	***Qda. El Emboque***
2	64.98	64.66
5	90.28	89.85
10	107.02	106.50
25	128.20	127.57
50	143.90	143.20
100	159.50	158.72
200	174.99	174.14
500	195.55	194.60

Tabla 8.10.- Intensidad para los puentes seleccionados para cada periodo de retorno.

Los resultados basan su diferencia de unas quebradas a otras en el valor de T_c que introdujimos, ya que los valores de precipitación son los mismos. Como se explicaba en el *apartado 8.4.2*, éste nos marcará la duración de la precipitación, por lo que:

- T_c altos corresponde a precipitaciones largas. Obtenemos intensidades menores.
- T_c bajos corresponde a precipitaciones cortas. Obtenemos intensidades mayores.

Con esto vemos como la Qda. La Bóveda tiene el resultado más alto de intensidad con 112.84 mm/h al tener el T_c más bajo de todos con 0.46 horas.

8.4.4. Coeficiente de escorrentía

Para conocer la lluvia neta que pasará a formar parte de la escorrentía superficial, se calcula el coeficiente de escorrentía (C), dependiente de la precipitación y de las llamadas abstracciones iniciales, o cantidad de agua que va a ser retenida, y por lo tanto, no es efectiva para producir caudales. Para estimar este parámetro se debe contemplar, no sólo las características físicas de la cuenca, sino también el punto de vista climático.

Si contemplamos el factor climático, es decir, los regímenes de precipitaciones anuales, en termino medio, son abundantes, se caracterizan por concentrarse en los meses de Mayo-Octubre, y suelen ser intensos. Durante la estación lluviosa, buena parte del agua

de precipitación no tiene la posibilidad de infiltrarse, ya que con lluvias continuas e intensas el suelo queda saturado impidiendo que la infiltración sea efectiva. Esto hace que se haya decidido plantear dos escenarios para el cálculo del coeficiente de escorrentía, ya que éste va a depender de la capacidad máxima de retención del terreno: escenario en condiciones de saturación del suelo y de no saturación del suelo. Obteniendo dos coeficientes de escorrentía, obtendremos dos caudales punta diferentes según las condiciones en las que se produzcan las precipitaciones, en suelo seco, finales de la estación seca, o en suelos saturados, durante o después de la estación lluviosa.

Para condiciones de suelo totalmente seco, según *López Cadenas y Mintegui (1986)*, " ante cualquier aguacero, inicialmente, la capacidad de infiltración es alta, pero en poco tiempo sufre un descenso rápido debido al efecto combinado de una serie de factores: la compactación de la superficie por el impacto de las gotas, el taponamiento de huecos por las partículas terrosas que transporta el agua al escurrir por la superficie, el cierre de las grietas superficiales y el incremento del contenido de humedad del suelo que lleva consigo una notable reducción de las fuerzas capilares cuya succión hace descender las aguas". Esto supone que la capacidad de infiltración disminuye muy rápidamente en condiciones de sequedad extrema, como al final de la estación seca o condiciones de sequía.

En condiciones donde el suelo ha superado su capacidad de almacenaje, se genera un importante escurrimiento. Es una situación habitual a finales de la estación lluviosa donde pueden producirse situaciones especiales de circulación transitoria de aire tropical con la formación y entrada de fenómenos ciclónicos generados en el mar Caribe, que pueden dar lugar a lluvias intensas durante varios días, como fue el caso del famoso huracán Mitch. En estas épocas el suelo está saturado en extremo y cada pequeño aguacero, aún sin ser torrencial, produce importantes flujos de avenidas. También es en estos tipos de aguacero donde pueden generarse modificaciones de los cauces.

Por otro lado, contemplando las características físicas de la cuenca que influyen en el coeficiente de escorrentía, en el presente trabajo se va a utilizar la *tabla 8.11* donde se tiene en cuenta la cobertura vegetal, el tipo de suelo en cuanto a su capacidad de infiltración y la pendiente del terreno.

COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELO	PENDIENTE		
		Pronunciada	Alta	Media
		Mayor 50%	20% - 50%	5% - 20%
SIN VEGETACIÓN	Impermeable	0.80	0.75	0.70
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60
	Permeable	0.50	0.45	0.40
CULTVOS	Impermeable	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.40	0.35	0.30
PASTOS VEGETACIÓN LIGERA	Impermeable	0.65	0.60	0.55
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45
	Permeable	0.35	0.30	0.25
HIERBA GRAMA	Impermeable	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.30	0.25	0.20
BOSQUES DENSA VEGETACIÓN	Impermeable	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.25	0.20	0.15

Tabla 8.11.- Valores del coeficiente de escorrentía. Utilizados por la Instrucción de Carreteras Españolas.

A falta de un mapa de usos del suelo del municipio realizamos una ponderación de lo visto en los recorridos de campo con el fin de clasificar la cobertura vegetal dentro de los cinco campos del cuadro. Para esto se tiene en cuenta la vegetación predominante y el uso que se tiene de ella, por lo que entraríamos al cuadro por cultivos y por pastos-vegetación ligera, además de tener en cuenta las zonas más boscosas.

El tipo de suelo en cuanto a su capacidad de infiltración es poco permeable, con características más similares a la clasificación que en el cuadro aparece como impermeable.

De la observación del mapa de pendientes *(ver Anexo 1: Mapas; "Pendientes")* evaluamos que en la mayor parte del municipio, y sobre todo en la cabecera de las quebradas, tenemos pendientes pronunciadas mayores del 50%.

Con todo esto establecemos un coeficiente de escorrentia para cada escenario:

- **0.60** para condiciones donde el suelo no se encuentra saturado pero tampoco reseco por fuertes sequías, correspondiendo al inicio de la estación lluviosa.
- **0.80** para condiciones que reflejan los periodos finales de la estación lluviosa, donde el suelo se encuentra saturado y su capacidad de infiltración es muy poca o nula. Este valor también es representativo de las zonas donde se producen quemas

como práctica de cultivo al multiplicar el coeficiente inicial (0.60) por 1.3 (constante incluida en la información de la tabla). Estas zonas se tendrán en cuenta a la hora de realizar un mapa de usos del suelo del municipio.

8.4.5. Caudal máximo

Una vez determinado el coeficiente de escorrentía, podemos pasar a calcular los caudales mediante el método Racional. Estos caudales están asociados a las lluvias máximas diarias de un periodo de retorno determinado. La expresión es la siguiente:

$$Q = (C\ I\ A / 3.6)\ K$$

Q: caudal punta (m^3/s)
I: intensidad máxima media en el intervalo T_c (mm/h)
A: superficie de la cuenca (Km^2)
C: coeficiente de escorrentía

K: coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad K varía de unos episodios lluviosos a otros, pero su valor medio en una cuenca determinada depende fundamentalmente de su tiempo de concentración, y además de forma tan prevalente que a efectos prácticos puede despreciarse la influencia de las restantes variables tales como la torrencialidad del clima, etc. Para su estimación, en valores medios, se aplica la expresión:

$$\mathbf{K = 1 + (T_c^{1.25} / T_c^{1.25} + 14)}$$

El resultado de los caudales aparece en las *tablas 8.11, 8.12, 8.13, 8.14, 8.15 y 8.16:*

Quebrada El Jutal

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	78.37	5.186	0.6	1.049	**20.27**
2	151.0	78.37	5.186	0.8	1.049	**27.03**
5	209.8	108.90	5.186	0.6	1.049	**28.17**
5	209.8	108.90	5.186	0.8	1.049	**37.55**
10	248.7	129.09	5.186	0.6	1.049	**33.39**
10	248.7	129.09	5.186	0.8	1.049	**44.52**
25	297.9	154.63	5.186	0.6	1.049	**39.99**
25	297.7	154.63	5.186	0.8	1.049	**53.32**
50	334.4	173.57	5.186	0.6	1.049	**44.89**
50	334.4	173.57	5.186	0.8	1.049	**59.86**
100	370.6	192.38	5.186	0.6	1.049	**49.75**
100	370.6	192.38	5.186	0.8	1.049	**66.34**
200	406.7	211.07	5.186	0.6	1.049	**54.60**
200	406.7	211.07	5.186	0.8	1.049	**72.80**
500	454.3	235.87	5.186	0.6	1.049	**60.99**
500	454.3	235.87	5.186	0.8	1.049	**81.32**

Tabla 8.11.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en la Qda. El Jutal.

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	79.51	6.48	0.6	1.047	**25.78**
2	151.0	79.51	6.48	0.8	1.047	**34.38**
5	209.8	110.47	6.48	0.6	1.047	**35.82**
5	209.8	110.47	6.48	0.8	1.047	**47.77**
10	248.7	130.95	6.48	0.6	1.047	**42.47**
10	248.7	130.95	6.48	0.8	1.047	**56.62**
25	297.9	156.86	6.48	0.6	1.047	**50.87**
25	297.7	156.86	6.48	0.8	1.047	**67.82**
50	334.4	176.08	6.48	0.6	1.047	**57.10**
50	334.4	176.08	6.48	0.8	1.047	**76.14**
100	370.6	195.16	6.48	0.6	1.047	**63.28**
100	370.6	195.16	6.48	0.8	1.047	**84.38**
200	406.7	214.12	6.48	0.6	1.047	**69.45**
200	406.7	214.12	6.48	0.8	1.047	**92.60**
500	454.3	239.28	6.48	0.6	1.047	**77.58**
500	454.3	239.28	6.48	0.8	1.047	**103.43**

Tabla 8.12.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en la Qda. El Colorado.

Quebrada El Colorado

Quebrada El Emboque

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	58.31	27.959	0.6	1.087	**84.31**
2	151.0	58.31	27.959	0.8	1.078	**112.41**
5	209.8	81.02	27.959	0.6	1.087	**117.14**
5	209.8	81.02	27.959	0.8	1.087	**156.18**
10	248.7	96.04	27.959	0.6	1.087	**138.85**
10	248.7	96.04	27.959	0.8	1.087	**185.14**
25	297.9	115.04	27.959	0.6	1.087	**166.32**
25	297.7	115.04	27.959	0.8	1.087	**221.76**
50	334.4	129.13	27.959	0.6	1.087	**186.70**
50	334.4	129.13	27.959	0.8	1.087	**248.94**
100	370.6	143.13	27.959	0.6	1.087	**206.91**
100	370.6	143.13	27.959	0.8	1.087	**275.88**
200	406.7	157.03	27.959	0.6	1.087	**227.07**
200	406.7	157.03	27.959	0.8	1.087	**302.76**
500	454.3	175.48	27.959	0.6	1.087	**253.64**
500	454.3	175.48	27.959	0.8	1.087	**338.19**

Tabla 8.13.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en la Qda. El Emboque.

Quebrada Salamar

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	76.49	6.502	0.6	1.051	**24.89**
2	151.0	76.49	6.502	0.8	1.051	**33.19**
5	209.8	106.28	6.502	0.6	1.051	**34.58**
5	209.8	106.28	6.502	0.8	1.051	**46.11**
10	248.7	125.98	6.502	0.6	1.051	**41.00**
10	248.7	125.98	6.502	0.8	1.051	**54.66**
25	297.9	150.91	6.502	0.6	1.051	**49.11**
25	297.7	150.91	6.502	0.8	1.051	**65.47**
50	334.4	169.39	6.502	0.6	1.051	**55.12**
50	334.4	169.39	6.502	0.8	1.051	**73.50**
100	370.6	187.75	6.502	0.6	1.051	**61.09**
100	370.6	187.75	6.502	0.8	1.051	**81.45**
200	406.7	205.99	6.502	0.6	1.051	**67.04**
200	406.7	205.99	6.502	0.8	1.051	**89.39**
500	454.3	230.19	6.502	0.6	1.051	**74.89**
500	454.3	230.19	6.502	0.8	1.051	**99.85**

Tabla 8.14.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en la Qda. Salamar.

Río La Ringlera

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	56.57	15.226	0.6	1.092	**44.75**
2	151.0	56.57	15.226	0.8	1.092	**59.66**
5	209.8	78.75	15.226	0.6	1.092	**62.17**
5	209.8	78.75	15.226	0.8	1.092	**82.90**
10	248.7	93.34	15.226	0.6	1.092	**73.70**
10	248.7	93.34	15.226	0.8	1.092	**98.27**
25	297.9	111.81	15.226	0.6	1.092	**88.28**
25	297.7	111.81	15.226	0.8	1.092	**117.71**
50	334.4	125.51	15.226	0.6	1.092	**99.10**
50	334.4	125.51	15.226	0.8	1.092	**132.13**
100	370.6	139.11	15.226	0.6	1.092	**109.83**
100	370.6	139.11	15.226	0.8	1.092	**146.43**
200	406.7	152.63	15.226	0.6	1.092	**120.52**
200	406.7	152.63	15.226	0.8	1.092	**160.70**
500	454.3	170.56	15.226	0.6	1.092	**134.63**
500	454.3	170.56	15.226	0.8	1.092	**179.51**

Tabla 8.15.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en el Río La Ringlera.

Río El Convento

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	66.74	10.7	0.6	1.067	**36.28**
2	151.0	66.74	10.7	0.8	1.067	**48.37**
5	209.8	92.73	10.7	0.6	1.067	**50.41**
5	209.8	92.73	10.7	0.8	1.067	**67.21**
10	248.7	109.92	10.7	0.6	1.067	**59.75**
10	248.7	109.92	10.7	0.8	1.067	**79.67**
25	297.9	131.67	10.7	0.6	1.067	**71.57**
25	297.7	131.67	10.7	0.8	1.067	**95.43**
50	334.4	147.80	10.7	0.6	1.067	**80.34**
50	334.4	147.80	10.7	0.8	1.067	**107.12**
100	370.6	163.82	10.7	0.6	1.067	**89.04**
100	370.6	163.82	10.7	0.8	1.067	**118.72**
200	406.7	179.73	10.7	0.6	1.067	**97.71**
200	406.7	179.73	10.7	0.8	1.067	**130.28**
500	454.3	200.85	10.7	0.6	1.067	**109.15**
500	454.3	200.85	10.7	0.8	1.067	**145.53**

Tabla 8.16.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en el Río El Convento.

Los resultados de caudal aquí obtenidos corresponden a las desembocaduras de cada una de las subcuencas seleccionadas, por lo que este valor se puede tomar como una característica cuantitativa representativa de cada quebrada del municipio.

Comparando los resultados, vemos que el valor más bajo de caudal es el de la Qda. El Jutal con 20.27 m^3/seg, mientras que en la Qda. El Emboque el caudal llega a 84.31 m^3/seg. Esta alta diferencia se relaciona directamente con las características físicas de cada subcuenca, más concretamente con su área, longitud y pendiente media del cauce principal; así como con su coeficiente de escorrentía y por tanto el uso del suelo que se esté dando. Esta relación se mostraría de la siguiente forma, siempre y cuando se siga la metodología desarrollada en este documento:

-A mayor área: *mayor caudal*.
-A mayor longitud del cauce principal*: menor caudal*.
-A mayor pendiente media del cauce principal*: mayor caudal*.
-A mayor coeficiente de escorrentía*: mayor caudal*.

Con todo esto podremos extrapolar al resto de subcuencas del municipio y así poder estimar los caudales asociados a cada una de ellas.

8.4.6. Caudal máximo soportable

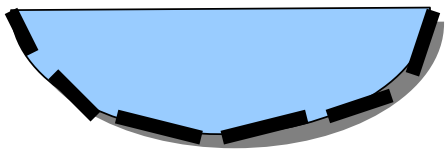
Para poder analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca, determinamos en diferentes secciones su capacidad o caudal máximo soportable. En el caso que nos ocupa hemos elegido cuatro puentes especificados como puntos críticos del municipio por su potencialidad a desbordar.

De ellos, el de Qda. Las Flores y el de Qda. La Bóveda se encuentran en la parte media de la quebrada; mientras que el de Qda. El Emboque y el de Qda. Seca se sitúan cerca de la desembocadura. Su selección se ha basado en la propia dimensión (siendo los que secciones más grandes presentan y por tanto más seguridad ofrecen), y en los antecedentes en cuanto a desbordamientos. Es este aspecto cabe decir que todos llegaron a llenarse para la avenida del huracán Mitch, e incluso pasó agua y material por encima de su estructura, por lo que se cortó el paso en las carreteras que los atraviesan.

Para su cálculo no se tiene en cuenta la carga sólida que transporta la corriente, lo que hace aumentar su volumen considerablemente sin que se hayan podido calcular los m^3 de los que tratamos. Utilizamos la fórmula propuesta por *Manning*:

$$Q = S\,R^{0.67}\,j^{0.5}/n$$

S: sección mojada del cauce en m^2 j: pendiente del lecho del río en m/m
R: radio hidráulico (m) n: coeficiente de rugosidad de Manning



- Sección mojada: S (m^2)

[redacted] - Perímetro mojado: X (m)

R = radio hidráulico se calcula como S / X.

n = coeficiente de rugosidad de Manning puede oscilar entre 0.04 y 0.07 en ríos de montaña con ancho inferior a 30m. Se atribuye a lechos con abundantes piedras y grandes bloques.

Los resultados aparecen en la *tabla 8.17:*

Sección	Subcuenca	S (m2)	R (m)	j (m/m)	n	Qmax (m3 /seg)
Puente Qda. Las Flores	Río La Ringlera	19.80	1.11	0.02	0.06	**50.04**
Puente Qda. La Bóveda	Río El Convento	16.10	0.99	0.03	0.06	**46.16**
Puente Qda. Seca	Qda. Seca	20.06	1.02	0.04	0.04	**101.64**
Puente Qda. El Emboque	Qda. El Emboque	135.00	2.11	0.02	0.07	**449.80**

Tabla 8.17.- Caudal máximo soportable en los puentes seleccionados.

Una vez obtenidos los caudales máximos soportables para cada una de las estructuras, analizamos los caudales esperados en esos puntos para diferentes periodos de retorno con el fin de estimar un porcentaje de probabilidad de desbordamiento.

El caudal esperado para un mismo año será diferente dependiendo de las condiciones de saturación del suelo, o lo que es lo mismo, del valor del coeficiente de escorrentía. Por este motivo se marcan dos umbrales diferentes de desbordamiento, uno para cada valor de C *(ver apartado 8.4.4)*

Umbral de capacidad soportable para C = 0.6

Umbral de capacidad soportable para C = 0.8

El periodo de retorno que indica el umbral de capacidad soportable se interpreta de la siguiente forma:

Periodo de retorno	Probabilidad de que se produzca un caudal mayor de esa magnitud (m^3/seg) en un día del año produciendo desbordamiento.
2 años	50%
5 años	20%
10 años	10%
25 años	4%
50 años	2%
100 años	1%
200 años	0.50%
500 años	0.20%

El resultado de los caudales esperados en los puentes seleccionados, relacionado con el caudal máximo soportable en esos mismos puntos aparece en las *tablas 8.18, 8.19, 8.20 y 8.21:*

Puente de Quebrada Las Flores (Río La Ringlera)
Qmáx soportable = 50.04 m^3/seg

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	86.24	4.879	0.6	1.046	**19.64**
2	151.0	86.24	4.879	0.8	1.046	**26.19**
5	209.8	119.83	4.879	0.6	1.046	**27.29**
5	209.8	119.83	4.879	0.8	1.046	**36.39**
10	248.7	142.04	4.879	0.6	1.046	**32.35**
10	**248.7**	**142.04**	**4.879**	**0.8**	**1.046**	**43.13**
25	297.9	170.14	4.879	0.6	1.046	**38.75**
25	297.7	170.14	4.879	0.8	1.046	**51.67**
50	334.4	190.98	4.879	0.6	1.046	**43.50**
50	334.4	190.98	4.879	0.8	1.046	**58.00**
100	**370.6**	**211.68**	**4.879**	**0.6**	**1.046**	**48.21**
100	370.6	211.68	4.879	0.8	1.046	**64.27**
200	406.7	232.25	4.879	0.6	1.046	**52.90**
200	406.7	232.25	4.879	0.8	1.046	**70.54**
500	454.3	259.23	4.879	0.6	1.046	**59.09**
500	454.3	259.23	4.879	0.8	1.046	**78.79**

Tabla 8.18.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en el puente de Qda. Las Flores.

Puente de Quebrada La Bóveda (Río El Convento)
Qmáx soportable = 46.16 m^3/seg

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	112.84	3.82	0.6	1.026	**19.79**
2	151.0	112.84	3.82	0.8	1.026	**26.39**
5	209.8	156.80	3.82	0.6	1.026	**27.50**
5	209.8	156.80	3.82	0.8	1.026	**36.67**
10	248.7	185.86	3.82	0.6	1.026	**32.60**
10	**248.7**	**185.86**	**3.82**	**0.8**	**1.026**	**43.46**
25	297.9	222.64	3.82	0.6	1.026	**39.05**
25	297.7	222.64	3.82	0.8	1.026	**52.06**
50	**334.4**	**249.90**	**3.82**	**0.6**	**1.026**	**43.83**
50	334.4	249.90	3.82	0.8	1.026	**58.44**
100	370.6	276.99	3.82	0.6	1.026	**48.58**
100	370.6	276.99	3.82	0.8	1.026	**64.77**
200	406.7	303.90	3.82	0.6	1.026	**53.51**
200	406.7	303.90	3.82	0.8	1.026	**71.08**
500	454.3	259.23	3.82	0.6	1.026	**59.55**
500	454.3	259.23	3.82	0.8	1.026	**79.40**

Tabla 8.19.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en el puente de Qda. La Bóveda.

Puente de Quebrada Seca

Qmáx soportable = 101.64 m^3/seg

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	64.98	14.639	0.6	1.08	**45.96**
2	151.0	64.98	14.639	0.8	1.08	**61.28**
5	209.8	90.28	14.639	0.6	1.08	**63.86**
5	209.8	90.28	14.639	0.8	1.08	**85.15**
10	248.7	107.02	14.639	0.6	1.08	**75.70**
10	**248.7**	**107.02**	**14.639**	**0.8**	**1.08**	**100.94**
25	**297.9**	**128.20**	**14.639**	**0.6**	**1.08**	**90.68**
25	297.7	128.20	14.639	0.8	1.08	**120.91**
50	334.4	143.90	14.639	0.6	1.08	**101.79**
50	334.4	143.90	14.639	0.8	1.08	**135.72**
100	370.6	159.50	14.639	0.6	1.08	**112.81**
100	370.6	159.50	14.639	0.8	1.08	**150.41**
200	406.7	174.99	14.639	0.6	1.08	**123.80**
200	406.7	174.99	14.639	0.8	1.08	**165.06**
500	454.3	195.55	14.639	0.6	1.08	**138.29**
500	454.3	195.55	14.639	0.8	1.08	**184.38**

Tabla 8.20.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en el puente de Qda. Seca.

Puente de Quebrada El Emboque

Qmáx soportable = 449.80 m^3/seg

Periodo de retorno (años)	Precipitación tipo (mm)	Intensidad: It (mm/h)	Área (Km2)	Coeficiente de escorrentía: C	Coeficiente de uniformidad:K	Caudal: Q (m3 /seg)
2	151.0	64.66	27.35	0.6	1.08	**85.72**
2	151.0	64.66	27.35	0.8	1.08	**114.29**
5	209.8	89.85	27.35	0.6	1.08	**119.10**
5	209.8	89.85	27.35	0.8	1.08	**158.80**
10	248.7	106.50	27.35	0.6	1.08	**141.18**
10	248.7	106.50	27.35	0.8	1.08	**188.25**
25	297.9	127.57	27.35	0.6	1.08	**169.11**
25	297.7	127.57	27.35	0.8	1.08	**225.49**
50	334.4	143.20	27.35	0.6	1.08	**189.84**
50	334.4	143.20	27.35	0.8	1.08	**253.11**
100	370.6	158.72	27.35	0.6	1.08	**210.39**
100	370.6	158.72	27.35	0.8	1.08	**280.51**
200	406.7	174.14	27.35	0.6	1.08	**230.88**
200	406.7	174.14	27.35	0.8	1.08	**307.84**
500	**454.3**	**194.60**	**27.35**	**0.6**	**1.08**	**257.90**
500	**454.3**	**194.60**	**27.35**	**0.8**	**1.08**	**343.87**

Tabla 8.21.- Caudales para los distintos coeficientes de escorrentía y periodos de retorno en el puente de Qda. El Emboque.

Los resultados para C =0.6 (condiciones de principio de invierno o suelo no saturado) indican la siguiente probabilidad anual de desbordamiento sin tener en cuenta la carga sólida:

- 4% para Qda. Seca.

- 2% para Qda. La Bóveda.

- 1% para Qda. Las Flores.
- 0.2% para Qda. El Emboque.

Para C =0.8 (condiciones de saturación del suelo) la probabilidad anual de desbordamiento aumenta, de forma que tenemos los siguientes porcentajes:

- 10% en Qda. Seca, Qda. La Bóveda y Qda. Las Flores.
- 0.2% en Qda. El Emboque.

Si comparamos estos porcentajes con la realidad, vemos que la situación de desbordamiento no se da tan habitualmente como indican las cifras en los tres primeros puentes, como tampoco se corresponde el porcentaje tan bajo que resulta para la Qda. El Emboque. Esta disyuntiva tiene origen en diversos aspectos, principalmente en la poca representatividad de los datos pluviométricos y en la ausencia de un mapa de usos del municipio. Otro factor a tener en cuenta es la fórmula de Manning, donde valores como el coeficiente de rugosidad y pendiente media hacen variar considerablemente el resultado de caudal soportable.

Por otro lado, los caudales se refieren únicamente a un flujo líquido, sin tener en cuenta el material que se transporta en las avenidas, el cual puede llegar a suponer un volumen considerable que no se ha podido determinar. Esto hace que los valores de caudal aumenten al incluir la carga sólida, y por tanto la capacidad de las estructuras sea menor. Para futuros estudios sería importante determinar el caudal mínimo capaz de arrastrar carga sólida, y así evaluar el volumen potencial de la avenida.

Como conclusión podemos decir que aunque estos resultados no se correspondan directamente con lo ocurrido hasta la actualidad, los caudales que podemos esperar en años consecutivos van a ser muy altos, y por tanto se debería mejorar la toma de datos con el fin de ajustar lo más posible los fenómenos naturales con el cálculo matemático. De esta forma podremos prever situaciones que afectan a la vida cotidiana y a nuestros bienes.

9.ANÁLISIS DE INESTABILIDADES GRAVITATORIAS

La interpretación de la ocurrencia de inestabilidades gravitatorias requiere del conocimiento de las condiciones y procesos que las controlan en el área de estudio, no tanto en cuanto al proceso de movimiento de ladera en sí, sino por las consecuencias que ésta acarrea.

Las inestabilidades gravitatorias son causadas cuando la fuerza de la gravedad moviliza la roca o los suelos por la pendiente. Son una de las formas de erosión naturales conocido también como desgaste de masas y que es definido, de manera general, como la erosión que involucra como agente causante del movimiento a la gravedad. Dado que la

gravedad actúa permanentemente sobre una pendiente, las inestabilidades gravitatorias sólo ocurren cuando la fuerza de la gravedad excede la resistencia del material.

En cualquier parte de la superficie de la tierra, la gravedad empuja continuamente los materiales hacia niveles más bajos. El término más común que se utiliza para nombrar estos movimientos es el de deslizamientos o derrumbes, sin embargo, se trabaja en la actualidad para dar a conocer entre los técnicos y actores dedicados a estos procesos una nomenclatura común que facilite la compresión que de lugar a estudios comparables.

Para el entendimiento de la dinámica de este proceso, se presenta una caracterización de las diferentes tipologías de inestabilidades gravitatorias presentes en el municipio de Jucuarán. Con el mismo objetivo , se ha elaborado un inventario de un gran número las inestabilidades que actualmente se observan, donde se reflejan las características de éstas. Este inventario pretende iniciar una toma de registros continuos de este proceso. La metodología implementada incluye, además, la representación mediante la cartografía de las áreas afectadas. Para el análisis de susceptibilidad de este proceso, se han caracterizado los factores condicionantes y desencadenantes. Este análisis da lugar a una cartografía donde se zonifica el terreno según su mayor o menor susceptibilidad a que se generen inestabilidades gravitatorias. Es por tanto, una importante herramienta para el ordenamiento del municipio de Jucuarán.

Los factores condicionantes o internos son de carácter natural y establecen las características propias del terreno que permanecen sin cambio, o que varían muy poco desde el punto de vista de la perspectiva humana. La identificación de las condiciones y los procesos que propiciaron la inestabilidad, hace posible considerar esos mismos factores para estimar deslizamientos futuros (Varnes, 1985).

Los factores desencadenantes o extremos son factores externos que modifican las condiciones intrínsecas del terreno. Pueden ser de carácter natural o antrópico y son los que dan lugar a un aumento del esfuerzo cortante, produciendo variaciones en las condiciones de estabilidad, rompiendo el equilibrio. Los factores desencadenantes los que determinan el momento de ocurrencia de las inestabilidades. Son responsables, en gran medida de la magnitud de los movimientos. En el mejor de los casos, las áreas de ocurrencia de inestabilidades gravitatorias o susceptibles a inestabilidades, se pueden identificar junto con los eventos desencadenantes esperados. En el peor de los casos algunas áreas pueden ser no detectadas del todo.

En el presente estudio, se han considerado los siguientes factores condicionantes: pendiente, litología, fracturación, vegetación, orientación de laderas y procesos activos, de los que se han realizado las correspondientes cartografías. La influencia de cada uno de estos factores se detalla en el apartado correspondiente, en el que también se explica la metodología empleada para la elaboración de estos mapas temáticos.

Por otro lado, se han considerado los sismos y las precipitaciones como desencadenantes naturales y la modificación de la geometría de las laderas y el uso inapropiado en los cultivos los desencadenantes antrópicos de las inestabilidades de ladera. Los factores naturales han sido analizados con el fin de establecer una probabilidad de ocurrencia y evolución.

La identificación e integración de estos factores y el inventario de inestabilidades han sido la base para la elaboración del mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera en el municipio de Jucuarán.

9.1.Caracterización de la Amenaza

La cartografía, inventario y elaboración del mapa de inestabilidades, sirve como datos primarios para entender las condiciones que contribuyen a la ocurrencia de inestabilidades gravitatorias. A continuación se realiza una caracterización de las inestabilidades identificadas en cuanto a su tipología, clasificadas en función del tipo de movimiento y la relación entre el substrato rocoso y la masa desplazada.

Los movimientos en masa han sido representados mediante cartografías (Anexo 1) en la que se representan inestabilidades ocurridas durante los eventos extraordinarios que afectaron el país como lo fueron el Huracán Mitch (1998) y los Terremotos (2001), así como cicatrices de antiguas inestabilidades y zonas escarpadas.

Mediante el estudio de la fotografía aérea y el trabajo de campo se ha llevado a cabo la identificación de inestabilidades de ladera en el municipio con el fin de zonificar áreas con procesos de inestabilidad similares y poder cuantificar los factores que dan lugar a estos. Éstas fueron cartografiadas e inventariadas, con el fin de analizar tipologías, dimensiones, depósitos asociados, grado de desarrollo, grado de estabilidad, entre otras características. No han sido caracterizadas el total de las inestabilidades debido a la inexistencia de fotografías aéreas posteriores a los eventos que causaron mayor número de inestabilidades, a la dificultad de acceso a algunas áreas, tiempo y recursos necesarios para ello. Sin embargo se han visitado aquellos lugares identificados por la población donde el terreno quedo afectado por inestabilidades o grietas.

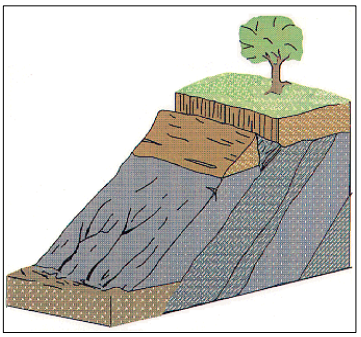
9.1.1.Tipología de las inestabilidades

Estos fenómenos son desplazamientos de masas de tierra o rocas por una pendiente en forma súbita o lenta y su ocurrencia depende de las siguientes variables: clase de rocas y suelos, orientación de las fracturas o grietas en la tierra, cantidad de lluvia en el área, actividad sísmica, actividad humana (cortes en ladera, falta de canalización de aguas, etc.), erosión (por actividad humana y de la naturaleza).

Las inestabilidades gravitatorias o movimientos de masa no son iguales en todos los casos, y para poder evitarlos o mitigarlos es indispensable saber las causas y la forma como se originan. De forma general se pueden diferenciar cinco tipos de movimientos de ladera, los deslizamientos (rotacionales y traslacionales), los desprendimientos y los flujos (rocosos y de suelo), generados en las formaciones basalto-andesita con características estructurales y geomecánicas descritas en el capitulo 6_Geología_Marco geológico local.

El esquema de clasificación que se usa más generalmente divide a los deslizamientos en diferentes tipos de acuerdo con el material que es trasladado y al tipo de movimiento (Varnes, 1978). La velocidad del movimiento y la cantidad de agua mezclada con el material son parámetros secundarios que definen algunos tipos de deslizamientos. Reconocer el tipo de deslizamiento presente en determinada área, ayuda a explicar cómo y dónde han contribuido los factores a la inestabilidad de la pendiente natural en el pasado.

Deslizamientos



Los deslizamientos traslacionales se producen a favor de una rotura generada por la existencia de planos de debilidad con dirección más o menos paralela a la superficie del talud e inclinación menor o igual que la cara del talud. Generalmente es una superficie de discontinuidad estructural o de contacto entre dos materiales de diferente competencia, donde se genera un plano de rotura. Son desplazamientos poco profundos con relación a la longitud del deslizamiento.

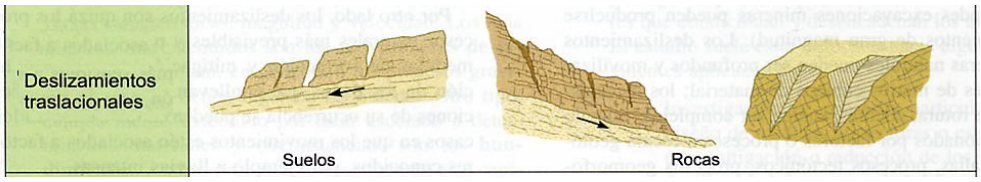


Fig.9.2.-Deslizamiento traslacional en suelos, en rocas y en cuña.

A la fecha se han cuantificado un total de 20 inestabilidades en el área de estudio. Este tipo de deslizamiento ha sido generado durante épocas de fuertes lluvias, normalmente empiezan a activarse cuando las pendientes del terreno son de 20º alcanzando valores no mayores de 50º. Particularmente en el caserío Puerto Caballos en la loma Monte Fresco, estas inestabilidades se producen a partir de pendientes de 30º y fueron activadas por el terremoto del 2001. Esto es debido a que las propiedades de la roca en cuanto a grados de meteorización y fracturación se encuentra muy afectadas dejando la roca en condiciones inestables.

La naturaleza de estas inestabilidades afecta generalmente al suelo vegetal. Estos tipos ocurren principalmente a lo largo de pendientes poco pronunciadas, donde se practican cultivos temporales sin realizar prácticas de conservación de suelos dichos movimientos se caracterizan por ser poco profundos. Se observan así unas profundidades de 0.5 a 2.5 m, con relación a la longitud de los deslizamientos en la zona llegaron a alcanzar dimensiones de hasta 60 metros, anchos variables con dimensiones entre los 7 y 40 m. Aunque muchas de las dimensiones de estas inestabilidades no son cartografiables a la escala de trabajo, es muy importante conocer la dinámica que los genera y las zonas donde se forman para tomar las medidas necesarias.

Foto 9.1. Deslizamiento superficial en el valle del río La Chiripa, en el caserío Huateras.

Foto.9.2. Deslizamiento traslacional ocurrido en una ladera contigua a la carretera, en el caserío La Ringlera.

De acuerdo al mapeo geológico realizado en el área suroeste del municipio, las inestabilidades se encuentran asociadas litológicamente a la unidad basalto-andesita en lajas (correspondiente a la Formación Bálsamo, miembro b3 del mapeo a escala 1:100,000). Dicha litología se caracteriza por presentar planos de discontinuidad entre diferentes grados meteorización que han afectado la roca o por diaclasas o fallas, que actúan como planos de debilidad del terreno paralelos al talud por donde desliza el material inestable.

La unidad basalto - andesita se encuentra aflorando en gran parte del municipio. En los afloramientos de la zona centro los espesores no superan generalmente los dos metros, sin embargo en la ladera Monte Fresco y en la zona del caserío Valle Nuevo la roca alcanza una potencia de hasta 25 m de espesor.

El grado de estabilidad de las cicatrices podría considerarse como activo, ya que las condiciones actuales del terreno no presentan indicios de estabilización. Por otro lado, el grado de desarrollo presenta perdida parcial de la cobertura vegetal en los cañones donde ocurrió el movimiento, en dichas zonas se muestra el importante grado de desarrollo que puede darse en la región.

En cuanto al tipo de depósito, se trata de bloques frescos sin erosión perceptible, de tamaños métricos de hasta 3m de diámetro. Parte del material ha quedado acumulado en la ladera en el cambio abrupto de pendiente por la vegetación de la zona y el resto ha sido

depositado en el cauce de la quebrada Seca o Pueblo Viejo. Por otro lado la cabecera se observa normalmente conservada y sin vegetación.

Asimismo pudo establecerse que la zona de estudio se ve afectada por deslizamientos peculiares (caminos de vacas) donde el terreno presenta una morfología típica de cáscara de naranja, con pequeñas ondulaciones con diámetros promedio de hasta 1 metro y profundidades entre 0.5 y 1.5 metros.

Foto.9.3.-Erosión de los suelos en forma de caminos de vacas

En la fotografía puede observarse el proceso en su fase inicial, afectando las laderas que se ubican sobre la carretera que conduce a Juacuarán

Foto.9.4.-Estado avanzado

Este tipo de deslizamientos afecta fundamentalmente la cubierta edáfica, depósitos eluviales y coluviales finos, generalmente sobre pendientes no mayores a 20. La velocidad de movimiento de este fenómeno es lenta y esta relacionada frecuentemente al uso intensivo e inadecuado del suelo. La fotografía representa el proceso en un estado más avanzado localizado en la zona NO en la loma San José y loma La Llanura.

Reptación

Foto.9.5.-Reptación. Se observa la fuerte inclinación de los árboles.

De igual manera algunos terrenos se han visto afectados por procesos de reptación. Este ocurre cuando la deformación que sufre la masa de suelo o roca como consecuencia de movimientos muy lentos por acción de la gravedad. Se suele manifestar por doblamiento o arqueamiento de las rocas, inclinación de los árboles y postes, aparecimiento de grietas. etc.

Este proceso ha afectado los terrenos del caserío El Encantado donde las condiciones físicas actuales manifiestan falta de cobertura vegetal debido a que los terrenos son utilizados para cultivos temporales y no se utilizan practicas de cultivos apropiadas.

Deslizamientos complejos

En algunos lugares se encontraron deslizamientos denominados complejos, se define

cuando presenta diferentes tipos de mecanismos de ruptura o de falla y la combinación de dos o más movimientos en masa. Pueden presentar las zonas superiores profundidades mayores, mientras que el movimiento en la parte media conlleva un arrastre más superficial.

Desprendimientos de suelo-roca

Los desprendimientos de suelo - roca tienden a generarse en los taludes de las quebradas y ser superficiales, presentan dimensiones menores a los producidos en las cabeceras de los cerros. El principal factor condicionante es el fuerte fracturamiento debido a que la roca ya no se presenta en bloques en cambio aflora en fragmentos con dimensiones centimetricas, así mismo una precipitación copiosa puede activar el movimiento.

Foto.9.7. Desprendimiento suelo-roca generado en el talud de la quebrada El Jutal

Estos movimientos se producen en rocas, escombros y suelos en los últimos dos casos están relacionados con una saturación de agua principalmente en los períodos de lluvia intensa, suceden frecuentemente en materiales inconsolidados con diferentes contenidos de humedad. La velocidad de movimiento es variable, de extremadamente lenta a muy rápida. Los flujos pueden ser divididos en deslizamientos de lodo (*mudslides*), deslizamientos de flujos (*flow slides*) y flujos de fragmentos (*debris flows*). Los flujos de lodo incluyen movimientos lentos y estacionales de acumulación de fragmentos que se encuentran en una masa arcillosa. Los deslizamientos de flujos son rompimientos repentinos y extensos de material granular o fragmentos. Ocurren cuando el material es afectado por algún tipo de sobrecarga, y esta es total o parcialmente transformada en exceso de presión de poros, generando pérdida repentina de resistencia, con el desenvolvimiento de flujos. Los flujos de fragmentos son flujos extremadamente rápidos saturados con alto poder destructivo, ocurren por causa de lluvias intensas

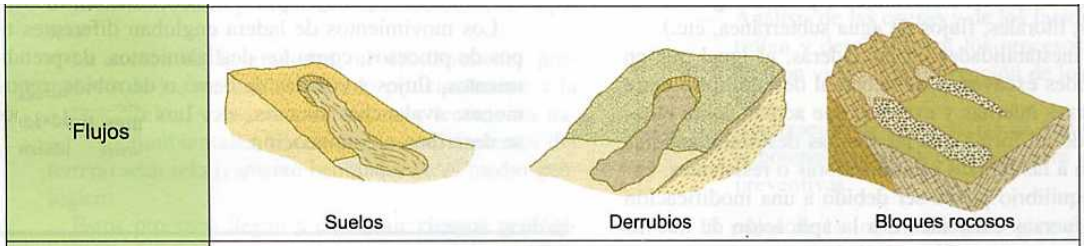


Fig.9.3.-Flujos: deslizamientos de lodo o de suelo, deslizamientos de flujos (derrubios) y flujos de fragmentos.

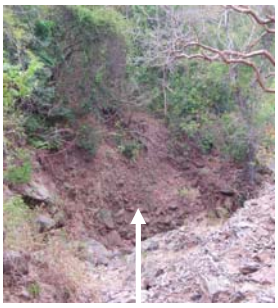


Foto.9.8. Colusión o depósitos de inestabilidad

En el área de estudio se ha contabilizado un total de treinta y un movimientos de este tipo desarrollándose en la unidad basalto-andesita en bolas y tobas de diferente composición y textura. La unidad basalto-andesita se presenta parcialmente

afectada por disyunción esferoidal de dos procesos diferentes, el primero se debe a la alteración de la roca causada por el ascenso de aguas termales a través de la fracturación, este mismo proceso estructural por medio de procesos meteorológicos a provocado de una manera lenta la descomposición de la roca.

En cuanto al tipo de depósito, la mayoría de los que fueron observados presentan una estructura incoherente, debido a que el material presenta una mezcla de roca suelo que es acumulado en el cauce de las quebradas y actualmente aparecen modificados los depósitos ladera abajo, debido a la erosión hídrica del torrente y a la acción antrópica, que ha incidido en la morfología mediante practicas de cultivo.

El grado de estabilidad de las cicatrices podría considerarse entre latente y estable, ya que las condiciones actuales del terreno presentan indicios de estabilización en cuanto a parámetros observados en campo tales como: revegetación en las cicatrices, no hay indicios de movimientos pequeños de material, aunque algunas de las cabeceras se observan normalmente erosionadas. Por otro lado, el grado de desarrollo de las inestabilidades en dichos taludes puede considerarse como incipiente.

Foto.9.5.-Inestabilidad revegetada

Es importante hacer notar que existe una diferencia en la vegetación que cubre el área afectada por el movimiento, apareciendo menos vegetada que las zonas colindantes, siendo esta una característica importante para el reconocimiento de campo.

Este tipo de movimientos afecta principalmente a las vías de comunicación, así como a los usuarios de las mismas. No obstante, cuando los depósitos de los materiales movilizados entorpecen el uso de las vías de comunicación y no se toman las medidas necesarias estas se van deteriorando y haciendo inaccesibles como es el caso de las carreteras de terracería que unían los caseríos Salamar–Agua Fría y Huateras–Chirilagua. Estos hechos hacen que se le dé una mayor importancia a dicho proceso como fenómeno recurrente.

10. CONCLUSIONES - RECOMENDACIONES

Gestión de Riesgos - Manejo de Recursos Naturales-Planificación territorial

Mediante el estudio geológico-ambiental del municipio de Jucuarán, se recomienda una regulación exhaustiva de los recursos naturales. Las regulaciones del uso y manejo de los recursos naturales: agua, suelo, aire y fuego. La historia actual del hombre nos ha llevado a sentirnos totalmente propietarios del terreno que compramos o sobre el que vivimos y de toda la vida que en él se da. Más que propietarios deberíamos sentirnos responsables del pedacito de tierra que nos ha tocado cuidar y respetar, ya que representa los más valiosos bienes de los que disponemos nosotros y nuestros descendientes. Si estamos claros que lo que hagamos de nuestra tierra y lo que dejemos hacer de la tierra por ella nos influye positiva o negativamente según el uso que le demos, avanzaremos encaminados por una misma lucha.

A partir de las conclusiones y resultados obtenidos a lo largo de este estudio, se han realizado propuestas de recomendaciones con el fin de mejorar la "calidad de vida" de los jucuareños. Entendiendo la calidad de vida como aquellas condiciones o entorno que nos proporciona bien estar, debemos pensar en un entorno equilibrado por la propia naturaleza, ya que esta es el ente regulador de cada elemento de la tierra. Hablamos entonces de recomendaciones enfocadas a la gestión de recursos naturales con el fin de minimizar las problemáticas que hemos ido construyendo por el inadecuado manejo de los recursos naturales. Con estas recomendaciones se pretende proporcionar una herramienta técnica para la gestión de los recursos naturales, incluyendo la componente de gestión del riesgo para un adecuado ordenamiento territorial que de lugar a un desarrollo del municipio sostenible.

Para la elaboración de estas propuestas se han tenido en cuenta los recursos naturales de la zona así como las necesidades de la población. Para llevarlas a cabo ha de actuarse a corto, medio y largo plazo, tanto por parte de las comunidades, como de los organismos locales, departamentales y nacionales. Es de vital importancia que exista una buena conexión entre los actores de forma que cada uno de ellos sea consciente y se haga cargo de las responsabilidades que le atañen..

Las recomendaciones de cada una de las componentes del estudio geológico Ambiental, dan lugar a un conjunto de acciones. Todas ellas se unifican mostrando una única manera de entender el entorno, un entorno como decíamos, en el que reine el equilibrio natural. Por tanto, se trata de recomendaciones que tienden a rectificar aquellas actividades y actitudes que han desequilibrado los ciclos naturales; aquellas actividades y actitudes que dan lugar a situaciones o circunstancias donde nuestro bienestar se ve perjudicado.

Teniendo en cuenta que la planificación territorial determina la vida y manejo de los recursos, se pretende adecuar el espacio físico sobre el que convivimos recursos y humanos de acuerdo a un desarrollo sostenible. Debe por tanto considerarse una

planificación de los usos del suelo, con la doble función de abastecer a la población de los recursos necesarios para su bien estar, sin agotarlos, contribuyendo así a su enriquecimiento, contribuyendo así, al enriquecimiento de los jucuareños.

Dada la incidencia del ordenamiento territorial en la vida de los pobladores se pretende trabajar de manera participativa y consensuada en las regulaciones de los recursos naturales y riesgos con el fin de adecuar el espacio de manera más provechosa, menos perjudicial y más sostenible posible. Se presenta a continuación un seguido de regulaciones que pretenden traducirse en ordenanzas municipales.

- Regulación del agua subterránea- áreas de recarga, áreas de surgencia de agua (manantiales), explotación, abastecimiento, calidad.
- Regulación de la masa forestal.
- Regulación de las actividades agropecuarias- regulación de cultivos temporales restringidos según las obras de conservación de suelo adecuadas. Evitar la quema. Combinación agro-forestería. Regulación de contaminantes agroquímicos. Zonas de pastoreo.
- Regulación de asentamientos humanos.
- Regulación Amenaza por inundación: avenidas torrenciales e inundación del Río Grande de San Miguel
- Regulación de las áreas inestables- zonificación del terreno según el uso apropiado.
- Regulación de las proyecciones urbanísticas y de infraestructuras.
- Regulación de los desechos sólidos y líquidos

El sig (sistemas de información geográfica) es una buena base para la elaboración de una planificación territorial. Para las cartografías presentadas se ha utilizado esta base en la que se recomienda una actualización continua en los mapas ya elaborados, sobre todas las actuaciones, desde nuevas construcciones, hasta cultivos, etc. Deben igualmente realizarse mapas con la delimitación de zonas aptas y no aptas para cada actividad.

Se muestran a continuación las conclusiones y recomendaciones de cada componente del estudio. Algunas de las conclusiones dan lugar al mismo tipo de recomendaciones. De esta manera se indica como son varios factores los que reclaman un mismo tipo de atención o actuación por derivar de una misma problemática.

Caracterización de los recursos hídricos

CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES
1.La zona estudiada no conforma un acuífero por sí solo, sino que forma parte de un acuífero más extenso, el de Usulután y Lempa-Usulután. En Jucuarán este acuífero solo está formado por los depósitos de quebrada. La planicie costera se va estrechando hacia el este y aumenta los limitantes de extracción de agua subterránea, sobretodo por el peligro de la intrusión salina.	1.Realizar el estudio hidrogeológico de todo el municipio estableciendo los límites hidrogeológicos reales. El estudio debería integrarse dentro de un estudio global de los acuíferos de la zona (acuíferos Lempa-Usulután, Usulután y Cuenca del Jocotal). Los pozos más cercanos al mar (Espino y Arcos del Espino) no pueden profundizarse más porque entraría agua salada. La explotación en la zona de las quebradas

	tampoco puede aumentarse mucho por el tema de la intrusión marina. En caso de crecimiento de población, el agua de abastecimiento debe proceder de la zona de Puerto Caballo. Igualmente en esta zona el agua no es abundante, y por tanto podría existir un problema de escasez de agua.
2. Todos los pozos y los nacimientos explotan o drenan acuíferos superficiales. Las divisorias de aguas subterráneas coinciden con las de agua superficial. Los pozos excavados tienen profundidades entre 2.5 a 16 metros.	2. Pueden profundizarse más los pozos para obtener un caudal superior, ya que según los resultados de los SEVs realizados es posible (no seguro) que exista agua en algunos puntos hasta una profundidad de unos 30 m. (no en todas las zonas, porque hay cambio lateral de estructuras y litología).
3. En el municipio no existen pozos perforados a gran profundidad, por lo que no se conoce la geología del subsuelo, ni las características hidrogeológicas de las capas.	3. Deberían realizarse sondeos de exploración para obtener la geología del subsuelo. También realizar más SEVs en la zona, sobretodo en las quebradas.
4. En toda la zona existe dos tipos de permeabilidad: en El Espino y Arcos del Espino la permeabilidad es por porosidad intergranular, y en el resto del territorio tiene doble permeabilidad, por fisuración (en los basaltos y tobas compactadas) y porosidad intergranular (en los sedimentos cuaternarios de las quebradas y en tobas poco compactas y alteradas).	4. Sobretodo en la zona de permeabilidad por frisuración debe tenerse especial cuidado con lixiviados y aguas negras, porque la infiltración es directa al acuífero, sin depuración natural por el terreno. De hecho esto debe tenerse en cuenta en todo el territorio por tratarse de acuíferos superficiales.
5. Se distinguen tres formaciones hidrogeológicas (a partir de la geología superficial, sobretodo): capas de basaltos-andesitas con aglomerados tobáceos, depósitos cuaternarios aluviales, y zona de manglar y planicie costera. Estas tres formaciones son las que conforman los tres tipos de acuíferos diferentes existentes en la zona. 5.1. La zona montañosa de Jucuarán (basaltos y piroclásticos terciarios) constituye un límite hidrogeológico de los acuíferos de los alrededores (la permeabilidad es muy baja en general). En esta parte del acuífero estudiado se produce una recarga-descarga bastante local a través de fracturas. En el balance considerado, esta zona sale que no se produce recarga. Sin embargo encontramos diferentes fuentes que demuestran lo contrario. Por eso, pensamos que existen acuíferos "colgados" de recarga-descarga rápida. Considerándolo así, el agua infiltrada en las montañas no llega a los esteros (en todo caso llega poca cantidad), sino que sería descargada antes de llegar a ellos, a través de estos nacimientos. En el mapa de zonas de puntos se observa que en la zona 2 (El Zapote, Gualora y Gualorita) y 4 (El Potrero, El Coyol, El Llano, Valle Seco, Samuria y Las Flores)	5.1. Especialmente En la zona de Samuria, las Flores, El Potrero, El Llano, El Coyol, Valle Seco, El Zapote, Gualora, los nacimientos se deberían limpiar de arenas y rocas que los estén taponando, y aprovechar esta agua, almacenándola y canalizándola para distribuirla a las comunidades. En las fichas del anejo 2 existen recomendaciones para cada punto. En general todos los nacimientos deberían de ser controlados por alguien, limpiándolos de vez en cuando aunque solo se usen ocasionalmente.

existen nacimientos con buenos caudales de agua. Son zonas de basaltos duros en lajas. El caudal máximo es de 5 l/s. 5.2. En Puerto Caballo, Concepción y la Bocana, situados en materiales aluviales cuaternarios, es donde se produce la recarga más fuerte. Las profundidades de los pozos excavados son de 4 a 10 metros y el agua se encuentra entre 2 y 7.5 metros de profundidad. Explotan un acuífero superficial ubicado en los depósitos aluviales de las quebradas. Estos pozos tienen una respuesta bastante rápida a la precipitación. Por tanto se trata de un acuífero somero recargado con agua de lluvia. Puede ser que también haya aportes laterales de agua procedentes de los basaltos de las zonas más altas, por medio de grietas y fracturas. Pero como se ha comentado, este aporte no puede ser muy grande. El pozo perforado de la planta Solar (situado en este tipo de materiales) también tiene una respuesta a la precipitación, ya que se observa una disminución del nivel piezométrico al no llover. 5.3. En el Espino y Arcos del Espino se explota un acuífero superficial en arenas de playa recargado por agua de lluvia. Este acuífero está separado del resto del territorio, sin entradas ni salidas laterales (funcionamiento como una isla) y es recargado por agua de lluvia. La profundidad de los pozos es de 2.5 a 4 m. y el agua se encuentra entre 1.5 a 2.5 m.	5.2. Realizar medidas de nivel piezométrico semanalmente en el pozo de la planta solar para ver la respuesta precipitación-recarga. En la quebrada Seca de Puerto Caballo podría realizarse un pozo profundo (no superior a 35 m.) para abastecer toda la zona con bombeo. También pude mirarse de profundizar el pozo de la planta solar y reubicar la bomba para que ésta no quede por encima del nivel del agua al bombear. 5.3. No se pude explotar la zona del Espino con pozos con bomba eléctrica. La extracción debe ser mínima y manual, tal como se ha venido haciendo hasta ahora.
6. Existen tres direcciones principales de flujo de agua subterránea: hacia el Este (dirección Chirilagua), hacia el norte (para el Río Grande de San Miguel), y hacia el S-SW (mar y manglares). En las quebradas se forman vías preferenciales de flujo de agua subterránea. Esto se observa por la disposición de las isopiezas.	6. Exploración del recurso cerca de las quebradas, por ser vía preferente de paso de agua.
7. El gradiente hidráulico es de 0.35 en zonas elevadas y 0.03 en la planicie. En ciertos puntos el valor es de 0.003. Esta disminución puede deberse a varios factores, como un cambio en la litología, cosa que provoca una variación de permeabilidad.	
8. El balance hídrico se ha realizado en la zona de materiales cuaternarios, ya que según el método usado, la infiltración en los basaltos es nula. La zona del Espino no es considerada por constituir un acuífero aislado del resto. El bance da positivo, es decir, no se está explotando más recurso del que entra. De todas formas los parámetros usados provienen de bibliografía, y no son reales de la zona. Por tanto, el error en el balance puede ser grande.	8. Deben realizarse pruebas de infiltración y humedad del suelo para determinar en campo los parámetros de la zona, y establecer un mejor balance. También debe llevarse un registro de las precipitaciones diarias.

9. Actualmente se está vertiendo basura en algunas quebradas, provocando la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, contaminación del aire, deterioro de la flora y fauna, contaminación del suelo y daños socio-económicos. Algunos pozos abandonados se rellenan con basura.	9. No verter basura incontroladamente a las quebradas. Clausurar y limpiar los puntos de vertido de basura del municipio. En caso que se deje de utilizar un pozo, nunca se le debe echar basura para taparlo (esto produce contaminación del agua subterránea). Lo aconsejable es sellarlo bien en superficie para que nadie ni nada pueda caer en el interior del pozo, dejando un agujero pequeño para poder introducir una sonda piezométrica (o una simple cinta métrica) con el objetivo de medir el nivel del agua.
10. Es inviable construir un relleno sanitario en el municipio de Jucuarán, debido a las características geológicas e hidrológicas de la zona: pendientes elevadas, existencia de varios sistemas de fallas, multitud de quebradas, y las zonas llanas son cubiertas por manglar o son zonas de inundación del Río Grande de San Miguel. Debe buscarse otra alternativa para la gestión de los residuos sólidos urbanos.	10. Buscar alternativa para relleno sanitario. Para solucionar el problema de los residuos sólidos urbanos, existen varias opciones: asociarse algunos municipios para buscar un emplazamiento adecuado y construir un vertedero controlado o llevar los residuos sólidos a un vertedero ya existente como el de Usulután. De todas maneras deben realizarse jornadas explicativas o talleres con la población para concienciarla de la problemática de la basura y la necesariedad de aplicar las 3-R: reducir, reciclar, reutilizar (en el *Anexo 3: Caracterización del recurso hídrico*, se han descrito maneras para reducir).
11. Las aguas de la zona estudiada presentan dos tipos de facies diferenciadas: bicarbonatada cálcica en la zona montañosa y bicarbonatada magnésica en la zona de la costa y cerca del manglar. Son aguas geoquímicamente similares. Aguas jóvenes que tienen como origen la infiltración de la lluvia. 11.1. La mayoría de muestras analizadas y representadas en el diagrama de Pipper, caen dentro de la zona representativa de las aguas potables. 11.2. Los cloruros y la conductividad eléctrica es más elevada en algunos puntos cercanos al mar y manglar, pero no existe intrusión marina. Las isolíneas de cloruros son paralelas a la línea de costa, debido a que la extracción de agua de pozos es mínima, y por tanto la interfaz agua dulce-agua salada está en equilibrio y vertical. 11.3. El pH de las aguas es algo ácido, pero de origen natural. Son agresivas. Los valores están en el límite de lo permitido por las reglamentaciones. 11.4. No parece existir contaminación por nitratos ni fosfatos. Son aguas de buena calidad físico-química.	11. Realizar análisis de coliformes fecales y totales, nitritos o amonio, sólidos en suspensión, total de sólidos disueltos, turbidez, hierro, para determinar la calidad de las aguas subterráneas. Sería ideal poder hacerlos en todos los puntos en que se ha realizado el análisis físico-químico. En caso de solo poder hacer 3 análisis de este tipo se recomiendan en los puntos: El Since (nºcampo 40) por tener un caudal grande y abastecer a todo Jucuarán; Samuria-Las Flores (nº de campo 95 y 96) por dar un caudal elevado, abastecen a las dos comunidades y aguas arriba existe un botadero en la quebrada; pozo de José Ofilio (nºcampo 35) por estar entre puntos de vertido de basura. Realizar análisis actuales en las muestras analizadas de Na, SO_4, NO_3, K, NH_4, Ca, Mg, para una buena determinación hidrogeoquímica de las aguas. Concienciar a la población de los efectos que pueden tener sobre la calidad del agua de bebida, el uso de las fosas, los puntos de vertidos sólidos incontrolados, el uso de ciertos productos para el campo. Construir letrinas aboneras en todas las casas, y abandonar el uso de fosas. Evitar el uso de productos químicos utilizados para el campo (herbicidas, pesticidas) que son peligrosos para la salud humana y para el medio ambiente, incluyendo las aguas subterráneas.

11.5. Respecto a la calidad bacteriológica no se tienen análisis actuales, pero con los que se obtuvieron del estudio del 2000, se concluye que son de mala calidad.	
En los SEVs realizados en la quebrada Seca podemos determinar que el recurso subterráneo se encuentra a una profundidad no mayor de 35 m. En el caso de presentar permeabilidad secundaria, podría existir agua a una profundidad mayor a 170 m. En los pozos excavados cerca de los SEV se observa una profundidad del agua de 4.5 m., y presentan un metro de suelo orgánico superficial, y unos 6 metros de bolos de basalto no alterado en algunos pozos, y de talpetate en otros (la geología presenta cambios laterales). En los SEVs realizados en la zona del Llano se observa que el recurso hídrico se encuentra a profundidades no mayores de 50 m. en porosidad secundaria.	12. Realizar algún sondeo de exploración y SEV paralelo a la costa en esta misma zona para determinar bien la geología y profundidad del agua, para perforar un pozo profundo. Aprovechar bien los manantiales de esta zona analizada, porque dan buenos caudales.

Anaisis de inundaciones

COCLUSIONES	RECOMENDACIONES
Caracterización de la hidrografía superficial	
1.-La morfología, o caracteres cualitativos, nos indica que la red de drenaje presenta un fuerte control estructural; con canales rectilíneos y elevada incisión; con predominio de erosión en la parte alta y sedimentación en la parte baja; y con una elevada pendiente del cauce principal. Por lo que existe una potencial fuerza erosiva elevada de sus cauces.	1.-Construcción de gaviones-diques de piedra en lugares estratégicos de los cauces. Su efecto es retener el agua y el material erosionado que baja por la quebrada. Además de reducir la cantidad de material en suspensión que arrastra la corriente, disminuye la pendiente y por tanto la velocidad de la corriente.
2.-La morfometría, o caracteres cuantitativos, nos lleva a decir que las quebradas son propicias para la formación de avenidas torrenciales por: - la rápida acumulación de las aguas, - la elevada magnitud con que se pueden presentar las crecidas, - la alta energía que se pude concentrar bruscamente, - la incorporación más rápida y simultánea de los caudales de escorrentía de un aguacero hacia un mismo punto, - la elevada pendiente de sus vertientes.	2.-Implantar un SAT (Sistema de Alerta Temprana) que permita predecir la amenaza asociada al carácter torrencial de las quebradas del municipio *(ver Anexo 5; "SAT")*
Caracterización de la amenaza	

3.-Las avenidas torrenciales están asociadas a: 3.1- los ríos y quebradas en sus partes bajas por la existencia de una unidad geomorfológica potencialmente inundable: los conos de deyección, 3.2- los ríos y quebradas en su parte alta y media por cambios bruscos de dirección combinados con las características morfológicas de cada punto (altura de talud, pendiente de las vertientes, etc.), 3.3- la escorrentía superficial no canalizada por su alta velocidad de desplazamiento y su alto potencial erosivo.	3.1.-Se recomienda la limpieza de los cauces para aumentar su capacidad soportable y reducir los daños en los inviernos con precipitaciones medias; e implantar un SAT ya que estas morfologías en si mismo representan una amenaza. 3.2.-Construcción de gaviones-diques de piedra en lugares estratégicos de los cauces. Su efecto es retener el agua y el material erosionado que baja por la quebrada. Además de reducir la cantidad de material en suspensión que arrastra la corriente, disminuye la pendiente y por tanto la velocidad de la corriente. También se recomienda implantar una zona de protección en los márgenes de las quebradas con el fin de no ocupar zonas de riesgo potencial; e implantar un SAT. 3.3.-Reforestación con el fin de disminuir el efecto de la erosión, contribuir a la estabilidad del suelo y aumentar la infiltración reduciendo la escorrentía. *(ver Anexo 5; El Convento)*
Análisis de las precipitaciones	
4.-Se dispone de un registro de precipitaciones acumuladas de 13 años incompleto, cuando debería ser de 20 años como mínimo.	
5.-Se han instalado tres pluviómetros en el municipio y se ha capacitado a la población para la toma de datos pluviométricos con el fin de complementar la red de monitoreo nacional, contribuyendo al registro continuo de precipitaciones y por tanto, al conocimiento de los procesos.	5.-Continuar con el registro mejorando la toma de datos e implantar los pluviómetros en la red nacional del SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales).
6.-Las precipitaciones anuales mantienen una ciclicidad en el tiempo, aunque no se dispone de un registro muy amplio para sacar conclusiones determinantes.	6.-7.-Comparación con series de otros estudios de forma que se tenga un mejor conocimiento del funcionamiento de la climatología en este sector del país. Considerar de manera preventiva los meses de máxima lluvia, así como noviembre, escenarios de máxima peligrosidad.
7.-Las precipitaciones mensuales presentan dos máximos, uno en junio y otro en septiembre, con una marcada disminución en julio. Por lo tanto, junio y septiembre deben considerarse los meses donde aumenta la amenaza, considerando esta alerta hasta finales de noviembre por la presencia de huracanes.	

8.-El principal factor desencadenante de avenidas torrenciales es la combinación de una elevada acumulación de precipitaciones y un evento de alta intensidad.	8.-9.-Instalación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT). Instalar un pluviógrafo para el conocimiento de la relación precipitación-tiempo. A corto plazo servirá como instrumento comparativo de los resultados de intensidades que se han conseguido mediante métodos indirectos. A largo plazo proporcionará intensidades reales que darán lugar a una mejor determinación de la lluvia umbral necesaria para el diseño de un SAT. Las comunidades ubicadas en zonas de inundación requieren de una buena organización para dar respuesta a esta amenaza.
9.-Los fenómenos que dan origen a las lluvias máximas diarias son de corta duración y alta intensidad. Esta característica de la amenaza da lugar a un rápido aumento de la escorrentia que puede dar lugar a avenidas torrenciales. Debe por tanto considerarse una respuesta rápida de la población.	
10.-Las precipitaciones en el municipio se presentan como una amenaza por un desconocimiento de las mismas y un inadecuado ordenamiento territorial. Nos encontramos con poblaciones ubicadas recientemente en el municipio y por tanto desconocedoras de los procesos naturales que tienen lugar en él, situadas en zonas consideradas de inundación, donde debe restringirse su uso.	10.-Tener en cuenta la cartografía realizada a la hora de proyectar y ubicar nuevos asentamientos e infraestructuras. Los asentamientos e infraestructuras deben, en la medida de lo posible, reubicarse o acomodarse según el grado de amenaza. Las comunidades asentadas en las zonas de inundación deben organizarse y prepararse en Comités de Emergencia capacitados para reaccionar en situaciones de riesgo. Continuar trabajando en las Mesas de Gestión de Riesgo Municipal y Departamental. Involucrar al gobierno local en la Gestión del Riesgo realizando Planes de Ordenamiento Territorial con ordenanzas reguladoras de los usos del suelo.*(ver Anexo 5; Plan de Ordenamiento Territorial)*
Estudio hidrometeorológico	
11.-El valor del coeficiente de escorrentía se ha determinado mediante métodos indirectos sin tener un mapa de usos del suelo, obteniendo unos valores de 0.60 para condiciones no saturadas pero tampoco resecas (sequía) y 0.80 para condiciones sobresaturadas.	11.-Realizar un mapa de usos potenciales del suelo que abarque todo el municipio, de forma que se adecue a la gestión de los recursos naturales y a la gestión del riesgo.

12.1.-Los caudales obtenidos mediante el método racional dan unos valores más altos que los que anualmente cabría esperar. 12.2.-La carga sólida presente en los cauces puede ser transportada por las avenidas torrenciales dando lugar a la formación de represas y desbordamientos donde los caudales de agua no serían por si solos considerados como amenaza.	12.1.-Continuar con el registro de las barras (medición de altura de agua) e ir corrigiendo el desfase del cálculo con la realidad. 12.2.-Instalación de barras en los diferentes puntos críticos. La Mesa Sectorial de Gestión de Riesgos de Jucuarán debe apoderarse de estas medidas de prevención. Fomentar la reforestación para disminuir el agua de escorrentia superficial
13.-La probabilidad anual de desbordamiento calculada en los puentes estudiados es de hasta el 10 %, valor elevado en relación con la realidad.	13.-SAT. Mejorar los datos de entrada y los métodos de análisis para la determinación de caudales con los pocos datos de que se disponen.
Mapa de áreas inundables	
14.-Se han establecido tres escenarios dependientes de la cantidad de lluvia acumulada desde el principio del invierno que definen tres escenarios de amenaza.	14.-Tener en cuenta la zonificación a la hora de construir nuevas infraestructuras y reubicar, en la medida de lo posible, las que se encuentren en situación de amenaza. Realizar Planes de Ordenamiento Territorial con ordenanzas reguladoras del uso del suelo.
15.-Dentro de cada escenario se ha determinado la magnitud de la amenaza respecto a la intensidad de las precipitaciones sin que se conozca la relación precipitación-tiempo, por lo que los límites son estimativos. Establecemos como intensidad baja precipitaciones acumuladas inferiores a 60 mm; intensidad media precipitaciones superiores a 60 mm e inferiores a 120 mm; e intensidad alta precipitaciones superiores a 120 mm.	15.-Instalar un pluviógrafo para conocimiento de la relación precipitación-tiempo. A corto plazo servirá como instrumento comparativo de los resultados de intensidades que se han conseguido mediante métodos indirectos. A largo plazo proporcionará intensidades reales que darán lugar a una mejor determinación de la lluvia umbral necesaria para el diseño de un SAT.
16.-La amenaza se ha dividido en: Baja (B), Media (M), Alta (A) y Muy Alta (MA), en función de la magnitud de los eventos, que van a depender del volumen del caudal líquido y la carga sólida asociada.	Tomar medidas preventivas de emergencia y post-emergencia para cada los diferentes grados de amenaza

17.-El área inundable 1 se corresponde con la escorrentía superficial no canalizada. Las condiciones asociadas a este área serían: -Precipitaciones acumuladas inferiores a 1600 mm e intensidad de la precipitación alta. -Precipitaciones acumuladas entre 1600 mm y 1900 mm e intensidad de la precipitación media. -Precipitaciones acumuladas mayores de 1900 mm e intensidad de la precipitación baja. EN ESTOS CASOS EL GRADO DE AMENAZA SERÍA MEDIO.	17.- Reforestación con el fin de disminuir el efecto de la erosión, contribuir a la estabilidad del suelo y aumentar la infiltración reduciendo la escorrentía. En zonas de cultivo temporal combinar el uso del suelo con cultivos permanentes realizando obras de conservación de suelos que aumenten la infiltración y disminuyan la erosión.
18.-El área inundable 2 se corresponde con la superficie inundada en la avenida del huracán Mitch. Las condiciones asociadas a este área serían: -Precipitaciones acumuladas entre 1600 mm y 1900 mm e intensidad de la precipitación alta. -Precipitaciones acumuladas mayores de 1900 mm e intensidad de la precipitación media. EN ESTOS CASOS EL GRADO DE AMENAZA SERÍA ALTO.	18.-19.-Realizar un SAT y un Plan de Ordenamiento Territorial con ordenanzas reguladoras del uso del suelo. Comités de Emergencia capacitados para dar respuesta a los diferentes escenarios y grados de amenaza.
19.-El área inundable 3 se corresponde con un área topográficamente baja que en una avenida de grandes dimensiones sería susceptible de ser inundada. Se relaciona directamente con la morfología de cono de deyección. La condición asociada a este área sería: -Precipitaciones acumuladas mayores de 1900 mm e intensidad de la precipitación alta. EN ESTE CASO EL GRADO DE AMENAZA SERÍA MUY ALTO.	

Como conclusión final, debemos remarcar que nos encontramos ante unas quebradas en proceso de evolución, con una gran cantidad de material susceptible de ser transportado y en un clima en el que los procesos meteorológicos se caracterizan por la intensidad con que se manifiestan, generando procesos torrenciales que pueden alcanzar una gran envergadura y en consecuencia con un peligro asociado que puede extenderse, para las quebradas de estudio, a toda la superficie del cono de deyección.

De igual manera y como ya se ha indicado, no debe olvidarse que todas las zonas próximas a todo tipo de quebradas son áreas con un peligro potencial.

PUNTOS CRÍTICOS

Los recorridos para establecer los puntos críticos se hicieron acompañados por habitantes de las comunidades cercanas a las quebradas. De esta forma se fueron identificando las zonas más afectadas por la avenida del huracán Mitch, así como los lugares donde la dinámica de las subcuencas incide en la vida cotidiana de sus pobladores.

En cada ficha aparece reflejada la situación en la que se encuentra el punto para la fecha de visita (entre el 11-6-2003 y el 1-8-2003) así como los elementos expuestos.

Las recomendaciones están englobadas en una actuación municipal, ya que tienen repercusión no sólo en cada punto tratado, sino en la subcuenca a la que pertenece. Por tanto éstas serán enfocadas como herramienta para un ordenamiento del territorio, de modo que planifique las infraestructuras o inversiones en el municipio y así cumplan con su utilidad y tengan la vida útil para la cual fueron diseñadas. Para conseguir esto se debe tener en cuenta la ubicación de estos puntos y las problemáticas que presentan.

CONCLUSIONES	**RECOMENDACIONES**
1.-La mayoría de los puentes existentes no tienen unas dimensiones y un diseño adecuados a la dinámica torrencial de las quebradas, ya que en esta situación se colmatan muy fácilmente, y en caso de bajada de un flujo caótico de agua y material sus ojos se taponan desbordando a zonas de uso potencial de la población.	1.-Implantar un SAT (Sistema de Alerta Temprana) que permita predecir la amenaza asociada al carácter torrencial de las quebradas del municipio *(ver Anexo 5; "SAT")*
2.-La situación de abandono que presentan la mayoría de los puentes en cuanto a su mantenimiento sin obstáculos, hace que la capacidad soportable de los mismos se vea muy reducida, además de favorecer su desbordamiento con caudales inferiores a los que podría canalizar. Esta misma conclusión se puede aplicar a todo tramo de la quebrada que atraviese zonas habitadas o se encuentre aguas arriba de las mismas, haciendo hincapié en los cauces que no presenten unos taludes definidos, ya que su capacidad es de por si muy reducida.	2.-Limpieza de los cauces y puentes para aumentar su capacidad soportable y disminuir el volumen de material susceptible de ser removido.

3.-La construcción de nuevos puentes, cuyo fin es facilitar las comunicaciones entre la población, se hace sin un dimensionamiento acorde con las características torrenciales del municipio, por lo que su situación puede ser el desencadenante de una problemática eludible o minimizable.	3.-Tener en cuenta las características torrenciales del municipio a la hora de dimensionar las nuevas estructuras. Esto implica tener en cuenta eventos excepcionales como el Mitch, que se suelen presentar espaciados en el tiempo pero con una contundencia muy alta.
4.-El trazo de vías de comunicación secundarias atravesando cauces de quebradas, sin una obra que permita el flujo de la escorrentía, provoca que en los inviernos se interrumpa el paso, además de dejar la vía en mal estado.	4.-Plan de Ordenamiento Territorial donde se tengan en cuenta las vías de acceso a las comunidades (ver Anexo 5; “POT”)
5.-La ubicación de acequias, muros, o cualquier otra modificación del curso natural de la escorrentía superficial, hace que el nuevo encauzamiento de las aguas pueda afectar en mayor medida a otros espacios útiles por la población.	5.-Plan de Ordenamiento territorial donde se controlen las obras dentro del municipio.
6.-El soterramiento de los cauces después de la avenida del huracán Mitch, con mayor incidencia en las partes bajas, hace que la capacidad soportable de los mismos haya disminuido con la consecuente problemática de desbordamiento.	6.-Vaciado de material hasta recuperar un talud que permita el encauzamiento de las aguas.
7.-El asentamiento de la población y de infraestructuras de uso cotidiano (lavadero, bomba de agua, escuela, botiquín, pozo, etc) en la zona de afectación de las quebradas crea un riesgo potencial con la llegada del invierno. Así mismo, la mayoría de los manantiales se encuentran en el cauce de las quebradas, por lo que se pueden soterrar.	7.- Realizar un SAT y un Plan de Ordenamiento Territorial con ordenanzas reguladoras del uso del suelo.

11. BIBLIOGRAFÍA

Alcañiz, J.; Cornellas, L. y Pujolà, M. 1997. Manual de restauració d'activitats extractives amb fangs de depuradora. Recuperació de Terrenys Marginals. Junta de Sanejament, Generalitat de Catalunya.

Altimir, J., Copons, R.; Amigó, J.; Corominas, J.; Torrebadella, J. i Vilaplana, J.M. (2001). Zonificació del territori segon el grau de perillositat d'esllavissades al principat d'Andorra. La Gestió dels Riscos Naturals.1es Jornades del CRECIT. pp 119-130. Institut d'Estudis Andorrans.

ANDA. 1973. Informe hidrogeológico de Chirilagua y sus alrededores. Dep. San Miguel.

ANDA. 1985. Estudio hidrogeológica del área Santa Elena, Ereguayquin, Jiquilisco.

ANDA. 1989. Estudio hidrogeológico del área donde se encuentra ubicado el cantón y caserío Gualozo. Dep. San Miguel.

ANDA. 1998. Proyecto de perforación de pozos gemelos en el oriente del país. Pozo y planta de bombeo zapatagua, jurisdicción de Chirilagua. Dep. de San Miguel.

ANDA. 2002. Estudio hidrogeológico del área del cantón el Bajío, Jurisdicción Chirilagua. Dep. San Miguel.

Aparicio Mijares, F. J. 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, Noruega Editores.

Ayala-Carcecdo, F.J. La inundación torrencial catastrófica del camping "las nieves" del 17 de Agosto de 1996 en el cono de deyección del Arás (Bisecas, Pirineo Aragonés)

Bayó i Dalmau, A. 1999. Homenaje. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.

Baxter, S. (1984) Léxico estratigráfico de El Salvador. Cel. El Salvador.

Carlos Edmundo Aguilar. 2001. Traducción de formaciones geológicas a unidades hidrogeológicas.

Carolina Torrecilla-Isabel Ramírez. 2002. Diagnosis e inventario de la susceptibilidad a las amenazas gravitatorias en las áreas afectadas por los terremotos del 2001 en el volcán de Usulután.

Centella, A.. 1998. Escenarios climáticos de referencia para la República de El Salvador.

Centro de Cooperación Integral sobre Tecnologías Alternativas. 2003. Diagnostico Participativo de ocho comunidades de Jucuarán, zona norte.

CENCLIM, Universidad de El Salvador. 1998. Escenarios climáticos de referencia para la República de El Salvador.

Cliff Hammer. 2000. Hydrogeology of a Central American Volcanic Complex. The lower San Miguel Basin. El Salvador.

Coordinación Proyecto FINNIDA. 1994. Seminario sobre manejo de datos hidrológicos.

COSUDE-ANDA. 2002. Métodos aplicados en Hidrogeología.

Custodio, E. Y Llamas, M.R. 1996. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona.

Diagnóstico socio-sanitario. Jucuarán. 2000-2001.

Duarte Saldaña, J.R. 1998. Estudio hidrogeológico del acuífero de Guluchapa, San Salvador, El Salvador. Tesis de Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología.

Estévez CIA. 1999. Estudio hidrogeológico del área cantones San Felipe y la Anchila. Dep. Usulután.

Estudio hidrogeológico del área Ereguayaquin-Concepción Batres en el dep. Usulután.

Guevara, J. A. 1980. Las características físicas del suelo y su relación con el riego. Tesis de la U.E.S. (G939).

Huiza, L.A.. 1996. Estudio hidrogeológico de los cantones: Analco y los encuentro, del municipio de Ereguayquin, departamento de Usulután.

IAH. 1995. Hydrogeological maps. A guide and a Standard legend.

Ibarra, A.M; Campos, U.; Rivera, F.J. Hacia la gestión sustentable del Agua en El Salvador. Propuestas básicas para elaborar una política Nacional Hídrica. 2001.

Industria e hidráulica, SA de CV. Reporte de perforación de pozos de producción de Paraisal.

JICA. 1997. El estudio de control integral de crecidas en el río grande de San Miguel en la república de El Salvador.

Lopez-Vera, F. 1993. II Curso de Introducción a la hidrogeología práctica. ICOG.

Losilla, M.; Rodríguez, H.; Shosinsky, G.; Stimson, J.; Bethune, D. 2001. Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en America Central.

Machorro, R. Y Requena, J. 2002. Evaluación de calidad de agua y análisis de crecidas en la porción occidental de la cuenca del río Cahabon. CUNOR, Guatemala.

MOP. 1961. Anales del servicio Geológico Nacional de El Salvador.

OIKOS Solidaridad. 2002. Reducción de la vulnerabilidad de la población de la subcuenca el Tránsito, cuenca baja del río Grande de San Miguel. Acciones, Experiencias y alcance.

OIKOS Solidaridad. 2002. Reducción de la vulnerabilidad de la población de la subcuenca El Tránsito, cuenca baja del río Grande de San Miguel. Estudio de vulnerabilidad-riesgo ambiental y obras de mitigación y prevención de desastres en la subcuenca el Tránsito.

OIKOS,SI,UCA. 2001. Programa de saneamiento ambiental integral para la comunidad El Borbollón y laguna El Joctal.

OIKOS,SI,UCA. 2002. Reducción de la vulnerabilidad – riesgo ambiental y obras de mitigación y prevención de desastres en la subcuenca El Transito.

OIKOS Solidaridad. 2002. Planificación comunal para disminuir el riesgo de enfermedades gastrointestinales en el Cantón El Jutal. Proyecto CORDAID.

Pinaud, M. 2001. Estudio hidrogeológico y geológico del complejo de San Marcelino (Departamento de Santa Ana, Sonsonate).

PRISMA. 2001. Estudio de la intrusión de aguas salinas en la zona costera de la Bahía de Jiquilisco.

PROMESA. 2001. Reconocimiento de la calidad de agua de bebida en las comunidades de la zona sur del municipio de Jucuarán, Usulután.

Reynolds Vargas, J. 2002. Manejo integral de Aguas subterráneas.

Romano, L.E. (1997) Catálogo de desastres, accidentes y ecología (1915-1990). Centro de Protección para Desastres (CEPRODE). San Salvador, El Salvador.

Rubio, J. Estudio Geológico de la cuenca del río El Convento.

Rudy Machorro (SGG). 2000. Hidrogeología física. Principios y aplicaciones.

Salazar, C. H. 1985. Evapotranspiración potencial en El Salvador. Comité Regional de recursos hidráulicos.

Santana, M. (2000) Caracterización de la Microcuenca del río Yamabal. APS. Morazán, El Salvador.

VVAA. (2000) Mitigación de Desastres Naturales en Centroamérica I. Análisis y Gestión de Riesgos. Ediciones AECI. Cooperación para el desarrollo. Madrid, España.

SDC, DDC, COSUDE, ANDA, PRISMA, CARA. 2002. Métodos aplicados a la hidrogeología. Taller internacional 2002.

Senciales Gonzalez, J.M. 1999. Redes fluviales, Metodología de análisis. Estudios y Ensayos, n° 34. Universidad de Málaga.

UCA. 2001. Programa de saneamiento ambiental integral para la comunidad el Borbollón y Laguna el Jocotal.

USGS. Landslides by Huricane Mitch en El Salvador. An inventory and descriptions of selected features.

Vargas, G. (1999) Guía Técnica para la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza por Movimientos en Masa. Cooperación Colombo Alemana Gtz, Colombia.

MATERIAL CARTOGRÁFICO	**INFORMACIÓN**	**ESCALA**	**FECHA**	**FUENTE**	**LUGAR OBTENCION**
Mapas topográficos	Curvas de nivel División administrativa ocal Red basica de comunicación viaria Asentamientos Red de drenaje	E-1:25.000 2555 IV NE (1991) 25555 I NO (1989) 2555 I SW (1990) 2555 IV SE (1993) 1:50.000 2555 I 2555 IV		Cuadrantes topográficos IGN	IGN
Mapas topográficos digitalizado	Curvas de nivel Red vial Red de drenaje	E-1:25.000		Cuadrantes topográficos digitalizados IGN	SNET (corregidos)
Geológico	Litología, tectónica	1:100.000	1964-1974	Mission geológica Alemena en El Salvador/CIG	IGN/CRN
Geológico digitalizado	Litología, tectónica	1:100.000	1964-1974	POT, MARN	SNET
Cuencas	Límites de subcuencas			SNET	Web.snet.
Uso del suelo	Usos del suelo		1996	MAG	SIG MARN
Fotografías aéreas	Fotointrepretación	1:40.000 1:20.000 1:20.000	1949 1963 1989		SNET SNET CRN
Mapa deslizamientos	Zonificación nacional de la susceptibilidad a deslizamientos	1:50.000	2002	SNET	SNET
Mapa precipitaciones	Zonificación nacional de las precipitaciones			MARN	PRISMA
Mapa de Sequia	Zonificación nacional			MARN	MARN

Mapa de permeabilidad	Zonificación nacional			PRISMA	PRISMA
Mapa de riesgo por inundación	Zonificación nacional			MARN	MARN

ANÁLISIS GEOLÓGICO AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO DE LA ASISTENCIA PRIMARIA EN SALUD (APS)

EJECUTOR

Coordinación del proyecto- **Carolina Torrecilla Macho**
Apoyo voluntario Geología- **Carles Fernández Lavado**
Hidrogeología- **Roser Mañé Jané**
Apoyo voluntario Hidrogeología- **Mónica Martín de la Casa**
Análisis de Inundaciones- **Jesús Barrio Lozano**
Apoyo voluntario Inestabilidades gravitatorias- **Luis Laj Hun**

BENEFICIARIO
MUNICIPIO DE JUCUARAN
(COMITÉ NORTE-COMITÉ SUR)

CONTRAPARTE
CONSORCIO PARA EL DESARROLLO INTEGRAL
CODEI

PROMESA FUNSALPRODESE CARITAS SANTIAGO DE MARIA CRD MEDICUS MUNDI ANDALUCIA

FINANCIADOR

Generalitat de Catalunya
Departament de Governació i Relacions Institucionals
Direcció General de Relacions Exteriors
Àrea de Cooperació Internacional

Jucuarán, febrero-diciembre 2003