



SENARA

**SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y GESTIÓN HÍDRICA (DIGH)**

**DIAGNÓSTICO DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS
ALUVIALES Y COSTEROS BRASILITO, POTRERO, PINILLA,
AVELLANAS-JUNQUILLAL Y COSTEROS SUR, EN EL CANTÓN
DE SANTA CRUZ, GUANACASTE.**

**CONVENIO MUNICIPALIDAD DE
SANTA CRUZ – SERVICIO NACIONAL
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS,
RIEGO Y AVENAMIENTO**

**INFORME FINAL
SENARA, MARZO DEL 2008**



Elaborado por: Hidrogeól. Hugo V
Rodríguez Estrada, mediante la Licitación
Abreviada 2008LA-000005-OC

Contraparte en SENARA: Hidrogeól.
Clara Agudelo Arango, Dirección de
Investigación y Gestión Hídrica.



16 de marzo de 2009
DIGH-094-2009

Para : **Ing. Carlos Romero Fernández**
Jefe Dirección de investigación y gestión hídrica

De: **Hidrog. Clara Agudelo**
Dirección de investigación y gestión hídrica

Asunto: **Remisión para entrega a la Junta Directiva del SENARA y la Municipalidad de Santa Cruz del Informe final "Diagnóstico de la vulnerabilidad de los acuíferos aluviales y costeros Brasilito, Potrero, Pinilla, Avellanas, Junquillal y costeros sur, en el Cantón de Santa Cruz, Guanacaste"**

Por medio de la presente se le hace entrega del estudio "DIAGNÓSTICO DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS ALUVIALES Y COSTEROS BRASILITO, POTRERO, PINILLA, AVELLANAS-JUNQUILLAL Y COSTEROS SUR, EN EL CANTÓN DE SANTA CRUZ, GUANACASTE", elaborado para el SENARA por el geólogo Hugo Rodríguez - licitación Abreviada N° 2008LA-000005-OC.

El estudio forma parte de los compromisos adquiridos bajo convenio por el SENARA con la Municipalidad de Santa Cruz. Se remite una copia impresa y una copia digital para ser entregados a la municipalidad.

El objetivo del estudio fue la generación de información en materia de hidrogeología como una herramienta de planificación para el manejo y protección de los acuíferos aluviales costeros en el cantón de Santa Cruz, específicamente en cuanto al diagnóstico de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos aluviales costeros de Brasilito, Potrero, Pinilla, Avellanas, Junquillal y costeros sur.

El producto entregado consta de una copia digital y dos tomos impresos denominados "Informe Final" y "Mapas de los Anexos". Los mapas elaborados en el estudio son: Geológico, Geomorfológico, Pendientes, Hidrogeológicos, Pozos y evidencias de intrusión salina, de ubicación de sondeos eléctricos verticales (SEVs) y pruebas de infiltración, Vulnerabilidad y riesgo a la contaminación y por último de Zonificación acuífera. El formato de edición con que se imprimieron los mapas finales se componen de cuatro juegos de mapas a escala 1:50.000 que cubren el área de estudio:

- Cuenca Costera Norte: Contempla toda la franja costera norte del cantón de Santa Cruz, en la cual se encuentra ubicados los acuíferos de Potrero y Brasilito.
- Cuenca Pinilla, Avellanas y Junquillal: Corresponde a la franja costera central del Cantón de Santa Cruz dentro de la cual se albergan los acuíferos Pinilla, Avellanas y Junquillal.
- Sector Norte de la Cuenca Costera Sur
- Sector Sur de la cuenca Costera Sur



Como resultado de la investigación fotogeológica, geológica y geofísica se determinó que la proporción de acuíferos aluviales es sumamente baja en las áreas de estudio, contrario a lo indicado en los mapas geológicos e hidrogeológicos regionales existentes, ya que la mayoría de los acuíferos en la zona costera están conformadas en rocas ígneas. A pesar de los resultados arrojados, el consultor desarrollo el estudio de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos costeros independientemente de los tipos rocosos, utilizando como unidad de análisis la cuenca de recarga.

Las unidades geológicas más favorables para almacenar y transmitir agua en las zonas de estudio son coluvios, aluviones y basaltos fracturados del Complejo de Nicoya, mientras que las unidades de basaltos sanos y gabros del complejo de Nicoya, dada su condición de rocas densas y masivas con baja presencia de fracturas, presentan condiciones acuíferas más pobres con caudales registrados de bajos a muy bajos.

Aunque el agua subterránea está albergada en diferentes materiales litológicos, no se encuentran indicios de aislamiento hidráulico entre estos materiales, ya que las líneas equipotenciales no muestran interrupciones ni discontinuidades al pasar de una unidad a otra, es decir, se observa continuidad hidráulica entre los materiales que indica la existencia en las cuencas de estudio de un sistema acuífero compuestos por diferentes materiales.

En el área de estudio se encuentran registrados en el Archivo Nacional de Pozos del SENARA (ANP), 319 pozos perforados legalmente y 44 pozos ilegales que no concluyeron su proceso de registro de perforación. Además, aunque el objetivo del estudio no incluía un inventario de pozos, para la evaluación de la intrusión salina se realizó una campaña de medición de niveles y conductividad eléctrica en pozos en 92 pozos, de los cuales 55 no se encuentran registrados en SENARA, que en su mayoría se encuentran perforados cerca de la franja costera de 1 km.

Se realizaron análisis de las propiedades de los suelos donde se identificó la capacidad de campo, punto de marchites, porosidad, densidad, granulometría y la capacidad de infiltración del terreno, en 83 sitios distribuidos en toda el área de estudio. Aunque los valores mínimos de permeabilidad determinados no parece presentar ninguna diferencia en relación al material y tipo geomorfológico, en los máximos se observa ciertos valores diferenciados que indican que la capacidad de infiltración de los suelos es más favorable en los sectores montañosos y ondulados, que en los planos y de baja elevación:

Tipo geomorfológico	Rango de permeabilidad (m/d)
Baja pendiente, plano, generalmente asociados con aluviones	< 0.04 a 1.08
Ligera pendiente, plano, generalmente asociados con coluvios	< 0.05 a 1.15
Baja pendiente, ondulado, generalmente originados por planicies de basalto	< 0.04 a 4.75
Montañoso abrupto, fuerte pendiente, dominado por rocas del Complejo de Nicoya	< 0.03 a 9.65



Con el objeto de tratar de visualizar la posición de la interfaz entre el agua dulce y el agua salada en los sectores costeros, se realizó dos campañas, una de medición de conductividades eléctricas en 52 pozos y la otra de geofísica con la ejecución de 68 sondeos eléctricos verticales (SEVs), además se revisó la información fisicoquímica existente en los registros del SENARA, indicándose en el mapa de “pozos y áreas con evidencias de intrusión salina”, las áreas en las que se ha detectado la intrusión salina o en las que se infiere esta condición a través de los sondeos geofísicos.

Estas áreas son de norte a sur, Playas Brasillito, Flamingo, Potrero, Roble, sector entre las playas Tamarindo y Langosta y evidencias puntuales entre las playas Avellanas y Negra. En la zona denominada cuenca costera sur de Santa Cruz, entre Lagarto y Ostional, no se encontraron indicios de afectación de las aguas subterráneas por procesos de intrusión salina.

Las zonas que presentan evidencias de intrusión salina no están condicionadas al material geológico que alberga las aguas subterráneas, es decir, se dan evidencias tanto en los acuíferos albergados en depósitos aluvionales, así como, en materiales del complejo de Nicoya.

Los estudios de campo donde se obtuvieron evidencias de intrusión salina fueron realizados en época lluviosa, en la cual se dan las condiciones más favorables para el acuífero, es decir, se da la recarga al sistema, los niveles del agua subterránea se encuentran más someros y se da una menor explotación de agua del acuífero; sin embargo, estas evidencias de intrusión puede agudizarse más en época seca y extenderse a zonas donde no se encontraron evidencias de intrusión salina en la época lluviosa, dado que no se da recarga a los acuíferos, los niveles del agua subterránea se encuentran más bajos en el acuífero y se da una mayor explotación, dada la alta demanda del recurso.

Para cuantificar la vulnerabilidad de los acuíferos el geólogo Rodríguez, utilizó la metodología G.O.D. propuesta por Foster y otros (2000), la cual considera tres aspectos físicos y de las condiciones del acuífero: profundidad al nivel estático, tipo de material de cobertura y grado de confinamiento. La vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos decrece de norte a sur y de oeste a este. Así, en el sector de Costeras Norte hay predominancia de áreas con vulnerabilidad alta y media, mientras que las Costeras Sur la mayoría corresponde a sectores de baja vulnerabilidad, de igual manera se observa que hacia el oeste predominan las zonas de vulnerabilidad alta y media y al este de las cuencas predominan las áreas de vulnerabilidad baja.

La información para levantar los mapas de vulnerabilidad a la contaminación en algunos sitios no está disponible con una densidad deseada, por esta razón es recomendable realizar cálculos de vulnerabilidad en sectores en los que actualmente hay poca información, como el sector de Potrero, dado que, aunque los datos disponibles produjeron como resultado una categoría de baja vulnerabilidad a la contaminación, estos resultados podrían variar al contar con información más detallada, sobre todo considerando que el nivel estático está a poca profundidad y que la cubierta superficial es de poco espesor y podría ser eliminada o adelgazada ante movimientos de terreno aún poco significativos. Debido a lo anterior el sector de Potrero se ha señalado con una simbología especial en los mapas de vulnerabilidad y de zonificación acuífera, catalogándose como un área en la que es necesario



investigación adicional para definir sus características de vulnerabilidad y determinar el tipo de uso del terreno recomendado.

Las fuentes potenciales de contaminaciones identificadas en la zona corresponden a centros de población o desarrollos turísticos, sin embargo, muchos de los centros de población están ubicados en zonas de baja vulnerabilidad, por lo que no necesariamente representan un riesgo o amenaza a las aguas subterráneas.

Como resultado final, con base en la sobreposición de los mapas de capacidad de infiltración de los suelos y de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, se elaboraron los mapas de zonificación acuífera, en los cuales se delimitaron seis categorías de manejo (se incluye el sector Potrero), cuyas características se resumen en el siguiente cuadro:

Categoría	Observaciones
1	Alta vulnerabilidad y alta permeabilidad superficial. Preferiblemente desarrollo forestal, con limitada impermeabilización del terreno y limitado vertido de fluidos potencialmente contaminantes de todo tipo.
2	Alta vulnerabilidad y baja permeabilidad superficial. El efecto de la impermeabilización del terreno no es tan importante como el vertido de fluidos potencialmente contaminantes de todo tipo.
3	Baja vulnerabilidad y alta permeabilidad. Áreas de recarga donde el impacto de la impermeabilización del terreno es el factor más importante. Debe evitarse el vertido de fluidos potencialmente contaminantes persistentes.
4	Sectores de baja vulnerabilidad y baja capacidad de infiltración. En principio, el desarrollo no tendría gran impacto en la cantidad ni en la calidad del agua subterránea.
5	Áreas sin relevancia acuífera. Acuíferos poco productores, con poca área de recarga.
6	Área en la que es necesario investigación adicional para definir sus características de vulnerabilidad y determinar el tipo de uso del terreno recomendado

Recomendaciones finales de manejo:

Esta dirección una vez analizada la información recomienda además:

- 1- Aplicar los mapas de zonificación acuífera, en los planes de ordenamiento territorial y evaluar los efectos de una actividad a desarrollar en las cuencas, dado que estos mapas contemplan tanto la susceptibilidad a la contaminación y a la recarga de los acuíferos.

Además se recomienda la aplicación de la "Matriz de criterios de uso del suelo según la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la protección del recurso hídrico (Acuerdo 3303 Junta Directiva del SENARA)", de la siguiente manera:

- Zonas de categoría 1 y 2, medidas de vulnerabilidad alta.
- Zonas de categoría 3, medidas de vulnerabilidad media.
- Zonas de categoría 4, medidas de vulnerabilidad baja.



- Zonas de categoría 5, medidas de vulnerabilidad despreciable.
 - Zonas de categoría 6, cualquier actividad potencialmente contaminante debe contar con estudios hidrogeológicos para evaluar la susceptibilidad del acuífero a la contaminación por el desarrollo de la actividad.
- 2- Es necesario que SENARA en coordinación con la Municipalidad implemente una red de monitoreo periódico de niveles de agua y conductividad eléctrica en los meses de la época seca principalmente en pozos cercanos a la costa enfocando inicialmente los esfuerzos en las zonas de evidencias de intrusión salina, en el sector de playa Conchal (dado que no se hizo evaluación por pozos ni geofísica en el estudio) y en los sectores de alta densidad de pozos en playa avellanas y Junquillal.
 - 3- Debido a que se han encontrado indicios de intrusión salina en los acuíferos aún a 500 m de distancia de la costa, es recomendable continuar condicionando la aprobación de construcción de pozos a una evaluación individual de este riesgo para aquellos sitios de pozos propuestos que se encuentren a menos de 1 km del mar o de algún manglar (excepto en las zonas expuestas en el siguiente numeral).
 - 4- Por último, se recomienda ampliar la zona de restricción de perforación de pozos en los sectores Brasilito (incluye Conchal) y Potrero a toda su área de recarga y en el sector de Pinilla hasta 1 km al este del límite este de la zona de intrusión, dado los resultados observados en el estudio:

Sector de Potrero:

En el mapa de pozos se puede observar la distribución de los pozos en la cuenca que descarga a Playa Potrero, los cuales se concentran a lo largo de los caminos principales y específicamente en el sector con evidencia de intrusión estos se concentran en su mayoría a más de 800 metros de la línea de costa, siendo pocos los pozos perforados en sitios cercanos a línea de costa, lo cual indica que el proceso de intrusión podría estarse generando por la explotación aguas adentro del continente y no en las cercanías a la costa.

Al ser un solo sistema acuífero en comunicación hidráulica entre los diferentes materiales que lo constituyen, se puede considerar que los efectos de la explotación en la subcuenca son independientes de la unidad a captar.

En este sector la intrusión salina posiblemente se deba a la sobreexplotación del recurso en el sistema y no por una explotación intensiva en cercanías de la costa, dado que como se observó anteriormente en cercanía de la costa se ubican pocos pozos y la mayor concentración se da a una distancia de la línea de costa entre los 500 m y 1500 m.

Sectores Brasilito y Conchal:

Al igual que en el caso del sector de Potrero, los sectores de Brasilito y Conchal se consideran como un solo sistema acuífero en comunicación hidráulica entre los diferentes materiales que lo constituyen, por lo cual los efectos de la explotación en la subcuenca son independientes de la unidad a captar. Ambos sectores presentan áreas de recarga pequeñas, limitadas al límite de la subcuenca costera.



En el sector de Brasilito se presentan indicios de intrusión salina y se observa una alta densidad de pozos (alta demanda del recurso) en distribuidos en toda la cuenca de recarga, tanto en la parte media alta, como en la parte baja o costera. En el sector de Conchal, aunque en el mapa de evidencias de intrusión salina no se muestra afectación, la ocurrencia de este efecto no se puede descartar que pueda estar ocurriendo dado que en este sector no se hizo evaluación de conductividad eléctrica en pozos, ni geofísica en el estudio, además de presentar características hidráulicas similares al sector de Brasilito.

Al igual que en el sector de Potrero la intrusión salina posiblemente pueda deberse a la sobreexplotación del recurso en el sistema dada la alta concentración de pozos y no solo por la explotación intensiva en cercanías de la costa.

Sector Pinilla:

Este sector presenta un área de recarga mayor que para los sectores anteriormente descritos (cuencas de los ríos San Francisco y Pinilla). Se muestra en el "mapa de evidencias de intrusión salina" áreas posiblemente afectadas por este proceso en una distancia mayor de 600m desde la línea de costa, se recomienda la restricción de permisos de perforación en la cuenca baja desde la línea de costa hasta un 1km atrás del límite este de la zona de intrusión demarcada en el estudio.

c.c: Expediente Municipalidad Santa Cruz
Consecutivo 



SENARA

**SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO
ÁREA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**DIAGNÓSTICO DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS
ALUVIALES Y COSTEROS BRASILITO, POTRERO, PINILLA,
AVELLANAS-JUNQUILLAL Y COSTEROS SUR, EN EL CANTÓN
DE SANTA CRUZ, GUANACASTE.**



INFORME FINAL

Elaborado por
Hidrogeól. Hugo V Rodríguez Estrada
Mediante la Licitación Abreviada
2008LA-000005-OC

Contraparte en SENARA:
Hidrogeól. Clara Agudelo Arango
Área de Aguas Subterráneas

Enero, 2009

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	4
1.1	Subdivisión del área de estudio.....	4
1.2	Actividades realizadas.....	5
2.	MARCO GEOLÓGICO.....	8
2.1	Rocas del Complejo de Nicoya	8
2.2	Depósitos coluviales.....	9
2.3	Depósitos aluviales.....	9
3.	GEOMORFOLOGÍA	10
4.	CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS.....	10
4.1	Presencia de acuíferos	10
4.2	Niveles de agua y flujo subterráneo	11
4.3	Parámetros hidráulicos	22
4.4	Modelo conceptual del acuífero y mapa hidrogeológico	23
5.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS	27
5.1	Permeabilidad.....	27
5.2	Porosidad, densidad y granulometría	28
5.3	Capacidad de campo y punto de marchitez.....	29
5.4	Profundidad de raíces	33
6.	EVALUACIÓN GEOFÍSICA.....	34
7.	CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y POSIBLE INTRUSIÓN SALINA	34
8.	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN	39
9.	ZONIFICACIÓN ACUÍFERA	53
9.1	Mapas de zonificación acuífera.....	53
9.2	Áreas de protección bacteriológica a los pozos de abastecimiento público.....	55
9.2.1	Ancho del área de captura	55
9.2.2	Distancia flujo arriba del pozo para un tiempo de 70 días	56
9.2.3	Distancia al punto de estancamiento	60
9.3	Formas y dimensiones del área de protección bacteriológica de cada pozo	60
10.	FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN	61
11.	MAPA DE RIESGO DE CONTAMINACIÓN	61
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62

AGRADECIMIENTOS	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 2.1 – Mapas geológicos (En el tomo “Mapas de los Anexos”)
- Anexo 3.1 – Mapas geomorfológicos (En el tomo “Mapas de los Anexos”)
- Anexo 3.2 – Mapas de pendientes (En el tomo “Mapas de los Anexos”)
- Anexo 4.1 – Resumen de la información de los pozos
- Anexo 4.2 – Gráficos de las pruebas de bombeo analizadas
- Anexo 4.3 – Mapas hidrogeológicos (En el tomo “Mapas de los Anexos”)
- Anexo 5.1 – Mapas de ubicación de SEVs y de las pruebas de infiltración (En el tomo “Mapas de los Anexos”)
- Anexo 5.2 – Datos de campo y gráficos de las pruebas de infiltración
- Anexo 5.3 – Reportes de los laboratorios de suelos
- Anexo 6.1 – Informe del estudio geofísico
- Anexo 8.1 – Mapas de vulnerabilidad y riesgo de contaminación (En el tomo “Mapas de los Anexos”)
- Anexo 8.2 – Mapas de zonificación según los factores del método G.O.D.
- Anexo 9.1 – Mapas de zonificación acuífera (En el tomo “Mapas de los Anexos”)
- Anexo 9.2 – Mapas de zonificación según la permeabilidad superficial

**SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO
LICITACIÓN ABREVIADA 2008LA-000005-OC**

**DIAGNÓSTICO DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS ALUVIALES Y
COSTEROS BRASILITO, POTRERO, PINILLA, AVELLANAS-JUNQUILLAL Y
COSTEROS SUR, EN EL CANTÓN DE SANTA CRUZ, GUANACASTE.**

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto “Diagnóstico de la vulnerabilidad de acuíferos aluviales y costeros Brasilito, Potrero, Pinilla, Avellanas-Junquillal y costeros sur, en el cantón de Santa Cruz ,Guanacaste”, se ejecutó mediante la licitación abreviada 2008LA-05-OC para el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA). La funcionaria del SENARA encargada de la coordinación y supervisión del presente estudio fue la Hidrogeól. Clara Agudelo Arango, del Área de Aguas Subterráneas de esa institución.

El objetivo del estudio fue la generación de información en materia de hidrogeología como una herramienta de planificación para el manejo y protección de los acuíferos aluviales costeros en el cantón de Santa Cruz, específicamente en cuanto al diagnóstico de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos.

No obstante los términos de referencia hacían énfasis en los acuíferos aluviales, durante el desarrollo del presente trabajo se determinó que la proporción de este tipo de acuíferos es sumamente baja en las áreas de estudio, ya que la mayoría de los acuíferos están conformadas en rocas ígneas. Sin embargo, esto no fue una limitante porque las actividades se realizaron independientemente de los tipos rocosos. En la medida de lo posible, se trató de intensificar la recolección de datos en las áreas aluviales y más cercanas a la costa.

En este informe final se presentan los resultados de cada una de las actividades realizadas y se da una interpretación de los datos recolectados. El enfoque primordial que se utilizó fue el de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos costeros, con especial interés en el aspecto de la intrusión marina.

1.1 Subdivisión del área de estudio

La zona de estudio se dividió en cuatro sectores correspondientes a cuencas, a los que se les identificó con los nombres de:

- Costeras Norte (o Brasilito – Potrero)
- Pinilla
- Avellanas – Junquillal
- Costeras Sur

Los linderos respectivos se irán mostrando en los mapas de resultados que se presentarán más adelante.

1.2 Actividades realizadas

A fin de obtener la información necesaria se llevaron a cabo las siguientes actividades. Los resultados y detalles de cada una de ellas se mencionarán más adelante.

- **Recopilación y análisis de la información geológica existente en mapas y documentos**

Se llevó a cabo una revisión de los documentos de la biblioteca de la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica en busca de trabajos específicos solamente se encontró el documento:

- Barrantes Víquez, Manuel. 1990. “Aspectos geoestructurales petrográficos de los basaltos, gabros y radiolaritas de la zona entre los cerros El Encanto, Capulín, Colorado y las playas de Platanar-Pedregosa, cantón de Santa Cruz. Guanacaste. Costa Rica”. Campaña Geológica, informe final.

En ese estudio se presentan las condiciones geológicas de una parte del sector sur del área conocida como Costeras Norte en la presente licitación.

Otra fuente de información identificada se encontró en los archivos del SENARA y corresponde a :

- Herrera Ocampo, Jorge y Chávez Cernas, Jorge. 1980. “Hidrogeología de la zona Brasilito – Potrero”. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas. Proyecto de investigación de aguas subterráneas en la península de Nicoya”. Depto. de Hidrogeología.

En este segundo documento se presentan las condiciones geológicas en la parte norte y central del área de Costeras Norte, específicamente entre la Punta Guachipelines y Punta Sabana.

Otra fuente de información más general es:

- Denyer Percy y Alvarado Guillermo E. 2007. “Mapa geológico de Costa Rica”. ICE/UCR/ECG. Librería Francesa.

Este último documento, aunque es el más reciente, se presenta a una escala 1:400000, por lo que su utilidad es de carácter orientativo general.

Existen otras referencias generales relacionadas con las condiciones geológicas, las cuales se mencionarán conforme vayan siendo discutidos los aspectos involucrados.

- **Delimitación por fotointerpretación de las unidades geomorfológicas**

Se realizó la fotointerpretación del área de estudio en fotografías aéreas tomadas en 1997. Para ello se adquirieron 20 fotografías en formato digital en el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Dichas imágenes fueron impresas y analizadas mediante un estereoscopio de oficina para obtener el resultado final, el cual estuvo basado también en observaciones directas hechas en el campo.

Las fotografías adquiridas y analizadas se presentan en el siguiente cuadro.

Terra No.	Línea de vuelo (L)	Fotos
02	42	131 a 133
02	41	93 a 95
02	40	87 a 89
02	39	50 a 52
10	38	34 a 36
03	36	22 a 24
03	35	50 a 53

- **Sondeos eléctricos verticales**

Se definió en el campo la ubicación de 68 sondeos eléctricos verticales (SEVs). Para esto se tomó como base la ubicación de puntos que había sido propuesta por el Área de Aguas Subterráneas del SENARA. Como primer paso se visitaron esos sitios y se hicieron las modificaciones que se consideraron pertinentes considerando acceso, ubicación, y constitución geológica entre otros factores. Fue indispensable recorrer todas las áreas de estudio para hacer este primer análisis.

Como paso seguido se empezaron a hacer los sondeos, y para ello se contó con los servicios y equipo de la firma Ingeofica S.A., con quienes primeramente se hizo un recorrido por todas las áreas para reconocer e identificar en el campo cada uno de los puntos de sondeo propuesto.

La configuración que se utilizó en todos los sitios es la de Schlumberger, con aberturas de AB/2 de hasta 100 m.

- **Determinación de las propiedades físicas de los suelos**

Se definieron en el campo 83 sitios para llevar a cabo pruebas de infiltración y para tomar muestras de suelo para realizarles varios análisis. De manera similar a como se hizo con los SEVs, los sitios de prueba y muestreo de suelo fueron definidos tomando como base la propuesta general hecha por el Área de Aguas Subterráneas del SENARA, y realizando inspecciones de campo de cada punto para definir la factibilidad real de llevar a cabo estas actividades en esos sitios. Se consideraron factores como acceso, ubicación, distribución dentro del área de estudio y material del terreno para definir los sitios definitivos.

En cada uno de los sitios en los que se hicieron pruebas de infiltración se tomaron muestras para el análisis en laboratorio de algunas características específicas de los materiales.

Los análisis realizados a las muestras fueron los siguientes:

- Capacidad de campo
- Punto de marchitez
- Porosidad
- Densidad
- Granulometría

Los dos primeros parámetros se obtuvieron en el laboratorio del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica y los tres siguientes en la empresa Geotecnia y Pavimentos S.A. (Geopasa). Adicionalmente, se hicieron observaciones de la profundidad de raíces, labor a cargo del Ing. Forestal Iván Chaverri, especialista en el tema.

- **Análisis de la información hidrogeológica existente**

Se identificaron los pozos registrados en los archivos del SENARA que se encuentran dentro del área de estudio y se inició la revisión manual de los expedientes físicos de esos pozos para resumir los datos requeridos. La cantidad total de pozos es de 429.

Se diseñó una hoja de datos que llenó para cada pozo analizado. La información recopilada versa sobre aquellas características que puedan ser de utilidad para los objetivos del trabajo, como lo son: ubicación, propietario, nivel estático, material y espesor acuífero, tipo de material de cobertura, parámetros hidráulicos y grado de confinamiento. Además, se recolectó información sobre las pruebas de bombeo existentes, de las cuales se encontraron 17 pruebas sin analizar y a las que se les practicó el respectivo análisis y cálculo de la transmisividad. Adicionalmente, se recolectaron los análisis químicos disponibles, los que resultaron en un total de 41.

- **Medición de niveles de agua y de la conductividad eléctrica en pozos seleccionados**

Se llevaron a cabo campañas de medición de niveles estáticos y de conductividad eléctrica en el agua de pozos seleccionados. Estas últimas mediciones se enfocaron en pozos cercanos a la costa, presumiblemente con mayor probabilidad de intrusión marina.

Para las mediciones eléctricas se utilizó un conductímetro de campo propiedad de SENARA con cable largo de manera que podía introducirse en los pozos que presentaran facilidad. En estos casos se levantó un perfil de conductividad a lo largo de la columna de agua. Donde esto no fue posible se midió la conductividad eléctrica en el agua extraída de los pozos.

- **Inventario de fuentes potenciales de contaminación**

Durante las giras de campo se hicieron anotaciones sobre las fuentes potenciales de contaminación a los acuíferos. La densidad de las observaciones se enfocó en aquellas áreas con mayor desarrollo habitacional o con alguna actividad especial.

- **Análisis, interpretación, e integración de la información obtenida**

En esta última etapa se evaluó de manera conjunta la información que se obtuvo mediante las distintas actividades que se mencionaron y se produjo el presente informe técnico con sus resultados, conclusiones y recomendaciones

2. MARCO GEOLÓGICO

A lo largo de la zona de estudio, los materiales rocosos se pueden agrupar en tres unidades principales: Rocas del Complejo de Nicoya, Depósitos Coluviales y Depósitos Aluviales. Los mapas incluidos en el Anexo 2.1 corresponden a los mapas geológicos en los que se muestra la distribución de estos materiales. Los términos de referencia para el presente trabajo no contemplaban el levantamiento geológico, sin embargo, se hicieron esos mapas por considerar que son el marco básico para este tipo de estudios. Dichos mapas fueron elaborados tomando en cuenta la información existente y con base en las observaciones de campo hechas durante los recorridos hechos para la recolección de información, fotointerpretación y datos de litología reportados en el archivo de pozos.

Las principales características de las unidades rocosas mencionadas se comentan a continuación.

2.1 Rocas del Complejo de Nicoya

Estas rocas cubren la gran mayoría del área y se pueden distinguir tres unidades dentro de ella: basaltos, radiolaritas e intrusivos. Los mapas geológicos que acompañan a este informe no muestran distinción entre estas unidades.

- **Unidad de basaltos**

Se trata de rocas originadas en erupciones submarinas en el Jurásico - Cretácico (Dengo, 1962, Arias y Denyer, 1992). Puede verse una buena cantidad de afloramientos de estos basaltos en los cortes de los caminos del área y en muchas áreas litorales, formando acantilados y plataformas de abrasión..

De manera general, esta unidad muestra un horizonte superior que se presenta fracturado y con una meteorización de baja a media. Comúnmente es conocido como “cascajo” dada la friabilidad de estos materiales, característica dada por la fracturación. Ese horizonte alcanza espesores del orden de entre medio y 5 m.

Debajo de ese horizonte existe una sección densa y más masiva, con menos fracturas y casi sin meteorización. Es de alta dureza y de una coloración gris oscuro a negro, con muy pocos cristales visibles. En la mayoría de los sitios estos basaltos están cubiertos por una capa de suelo de espesor variable, con máximos del orden de los 3 m.

Los basaltos forman una gran mayoría de las áreas montañosas y de relieve pronunciado, pero también constituyen sectores de baja elevación con un relieve relativamente plano que en otras

ocasiones ha sido confundido con planicies aluviales. Claros ejemplos de esta condición lo representan la planicie de Potrero, las áreas comprendidas entre San José de Pinilla y la costa, y las áreas de Playa Lagartillo, Pargos, Pochotes y Parte de Junquillal.

- **Unidad de radiolaritas**

Las radiolaritas se encuentran depositadas sobre los basaltos. Se muestran como rocas de un característico color rojizo de grano muy fino, de alta dureza, y en general poco meteorizadas. En algunos afloramientos es posible observar su estratificación. Aparentemente su abundancia es mayor en las partes norte del área de estudio, en los alrededores de Playa Conchal. En otras partes montañosas se les puede encontrar formando parches en las crestas de algunas montañas.

- **Rocas intrusivas**

Estos materiales están representados por gabros y son el resultado de intrusiones dentro de los basaltos pre existentes. Se les ha asignado una edad del Cretácico inferior (Arias y Denyer, 1992). En general son rocas masivas, de alta densidad, poco fracturadas y con muy poca meteorización, de una coloración gris claro. A diferencia de los basaltos, presentan una gran cantidad visible de cristales entre los que se distinguen plagioclasas, piroxeno y olivino.

Representan un porcentaje muy bajo en ocurrencia dentro del Complejo de Nicoya y se les encuentra formando algunas crestas montañosas.

2.2 Depósitos coluviales

Se trata de materiales acarreados principalmente por efecto de la gravedad desde sitios más altos. Se localizan principalmente al pie de las serranías. Se presentan con mayor abundancia en la cuenca de Potrero – Brasilito y generalmente están formados por bloques rocosos en una matriz arenosa con algunos lentes de limos y arcillas. La definición exacta de sus linderos es compleja en muchos de los sitios debido a que no siempre se da como un borde definido sino que el cambio es transicional, sobre todo entre esta unidad y la unidad de relleno aluvial, de la que no es sencillo diferenciarla.

Generalmente la pendiente de esta unidad es suave, con un relieve plano bastante uniforme.

2.3 Depósitos aluviales

Formada por la depositación de ríos y constituida por gravas, arenas, limos y arcillas dispuestos generalmente de una manera lenticular. Ocupan las partes más bajas de las zonas de estudio y su presencia es mayor al este de Potrero, áreas de Flamingo y Brasilito, la desembocadura del río San Francisco y la parte sur de Ocotal.

Su pendiente es muy baja y el relieve muy plano.

3. GEOMORFOLOGÍA

Como se comentó, la delimitación de las unidades geomorfológicas se hizo con base en el análisis de fotografías aéreas y en observaciones directas en el campo. De este análisis se definieron y diferenciaron las cuatro categorías de terreno que se mencionan a continuación.

- Terrenos planos de muy poca pendiente, generalmente representan formas de depositación recientes como aluviones aunque puede corresponder a otros tipos de materiales.
- Terrenos planos ligeramente inclinados, generalmente ubicados al pie de los cerros y en términos generales, pero no necesariamente, formados por depósitos coluviales.
- Terrenos de baja pendiente pero con cierta ondulación, en su mayoría originados por planicies de basalto, tienden a confundirse con los aluviones.
- Morfología abrupta, pendiente fuerte, sector montañoso dominado por rocas del Complejo de Nicoya, en su mayoría basaltos pero con algunos sectores de radiolaritas y de gabros. Formas de erosión.

En el Anexo 3.1 de este informe se adjuntan los mapas resultantes por sectores de estudio.

Como actividad adicional, y aunque no estaba contemplada en los términos de referencia para la realización del presente estudio, se produjeron los mapas de pendientes del terreno en toda la zona de estudio. Se definieron cuatro categorías de pendiente, que son las utilizadas de manera común en el método de cálculo de la precipitación que infiltra propuesto por Schosinsky y Losilla (2000). Esas categorías de pendiente son: 0 a 1%; 1% a 2%, 2% a 7% y mayor a 7%.

Los mapas de pendientes se incluyen en el Anexo 3.2

4. CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

4.1 Presencia de acuíferos

Las tres unidades litológicas mencionadas tienen la capacidad hidráulica de albergar acuíferos dentro de ellas. En el caso de las rocas del Complejo de Nicoya debe hacerse una diferenciación entre sus tipos rocosos ya que los mismos presentan diferentes características como se comentará de seguido.

Los basaltos del Complejo de Nicoya presentan generalmente un horizonte superior con cierta fracturación y un grado medio a bajo de meteorización. Estas propiedades hacen que la permeabilidad sea adecuada para formar acuíferos que se explotan en el área. Como se comentó, esta capa superior con propiedades acuíferas tiene espesores de hasta 5 metros aproximadamente. Se ha visto que estos acuíferos en los basaltos fracturados se presentan más en aquellas áreas formadas por estas rocas y que tienen una pendiente baja, con un relieve casi plano (ver mapa geomorfológico). Este es el tipo de condiciones que aprovechan los pozos de las áreas de Potrero,

Brasilito, Playa Real, Tamarindo, Pinilla, Avellanas y Marbella. Los caudales que se extraen de pozos en estas condiciones se ubican en su mayoría entre 1 y 5 l/s, aunque hay excepciones en el área de Pinilla que alcanzan hasta los 15 l/s (pozos VI-105, VI-107).

Los basaltos sanos, de manera similar a los gabros, son rocas densas y masivas, con baja frecuencia de fracturas, por lo que su permeabilidad y su capacidad para formar acuíferos es muy limitada. Los caudales reportados por pozos construidos en estas condiciones generalmente no superan los 2 l/s y se conoce de algunos que prácticamente son abandonados por su bajo caudal.

Las radiolaritas del Complejo de Nicoya son rocas que cuentan con algún grado de fracturación que les confiere cierta permeabilidad. Sin embargo, su elevación es generalmente una desventaja en términos de acumulación de agua ya que muy frecuentemente ocupan las partes altas de las serranías, a una altitud mayor a la del nivel estático, por lo que se encuentran sin saturar.

Las unidades de depósitos coluviales y aluviales tienen similares características hidráulicas. En efecto, hay dificultad para diferenciarlas en muchas localidades. Los caudales reportados en los pozos que los captan andan alrededor de 1 l/s. Muchos de esos pozos son del tipo excavados, con profundidades que no superan los 15 m.

Según las observaciones, aunque estos acuíferos están constituidos en diferentes litologías, se nota que hay continuidad hidráulica entre ellos. Es decir, el agua subterránea pasa de uno a otro de manera continua.

4.2 Niveles de agua y flujo subterráneo

Para conocer la posición de los niveles del agua subterránea se recopiló la información de los pozos en los archivos del SENARA y se llevó a cabo una campaña de medición de niveles estáticos en pozos seleccionados en los meses de noviembre y diciembre de 2008 como parte del presente trabajo. En el Anexo 4.1 se incluye un resumen de la información recopilada en el SENARA, la cual incluyó un total de 425 pozos. En ese anexo se presenta el número del pozo, las coordenadas, el propietario, nivel estático, material y espesor acuífero, información de pruebas de bombeo y de los parámetros hidráulicos básicos, material de cobertura del acuífero y grado de confinamiento.

Aproximadamente un 40% de los pozos con información tienen su nivel estático a menos de 5 m de profundidad; un 45% lo tienen entre 5 m y 20 m; un 14% entre 20 m y 50 m y sólo cerca de 1% lo presenta a más de 50 m.

Se nota una relación directa general entre la elevación de los pozos y la profundidad a su nivel de agua. De esta manera, los pozos con niveles más someros son los que se encuentran en las partes más bajas y viceversa. Como una consecuencia de esa relación y de la distribución de las rocas con la altitud, se ve también que los niveles más profundos se presentan en pozos que captan acuíferos formados en las partes más densas de los basaltos, ya que las partes altas de las serranías están constituidas por este tipo de roca.

En la campaña de medición de noviembre y diciembre de 2008 se visitaron 92 pozos, algunos de los cuales no se encuentran registrados en el SENARA. En varios de estos pozos no fue posible

medir el nivel estático porque se encontraban en operación o porque no había facilidades para introducir ningún cable. Esta campaña se aprovechó para medir la conductividad eléctrica del agua, tema que será tratado más adelante.

Los resultados de la mencionada campaña de medición se muestran en el cuadro 4.1. Para los pozos que no están inventariados en el SENARA se utilizó una nomenclatura propia, basada generalmente en el lugar o en el nombre del propietario.

Debe tenerse presente que los niveles estáticos reflejan las condiciones al momento de la lectura, ya que todos los propietarios consultados reportan fuertes cambios en el nivel estático entre las estaciones lluviosa y seca. Esas anotaciones se muestran también en el cuadro 4.1.

Con los datos de nivel estático obtenidos tanto en el SENARA como en el campo, y tomando en cuenta la elevación del terreno, se calcularon las elevaciones del nivel estático en cada pozo y de esa información se procedió a dibujar las líneas equipotenciales que se muestran en los mapas hidrogeológicos que ocupan el Anexo 4.3. La elevación del terreno fue obtenida de las hojas cartográficas respectivas editadas por el IGN. En total se utilizaron 150 pozos.

El cuadro 4.2 contiene los datos de nivel estático, elevación del terreno y elevación del nivel estático de los pozos con información que se utilizaron para la confección de las líneas equipotenciales, información que se obtuvo tanto de los archivos del SENARA como de las campañas de medición de campo. No se dibujaron las líneas equipotenciales en aquellas áreas en que la densidad de información era baja y no permitía una extrapolación con certeza.

Los datos de nivel estático reportados en el SENARA corresponden a varias épocas, y por lo tanto, las líneas resultantes, más que representar el estado del agua subterránea en un instante dado deben ser consideradas como una condición promedio que mezcla información de varias épocas. Es de esperarse que aunque se presenten cambios a lo largo del año, esas variaciones tienen la misma tendencia o comportamiento (nivel bajo al final de la época seca y alto al final de la lluviosa) en todos los sitios, por lo que la tendencia general de las direcciones de flujo resultantes debe mantenerse durante el año.

CUADRO 4.1 - NIVELES ESTÁTICOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA MEDIDOS EN EL CAMPO EN EL TRANCURSO DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN. MEDIDAS HECHAS EN NOV Y DIC 2008

Cuando la C.E. se midió dentro de pozos, esto se hizo hasta el fondo, que es la lectura más profunda. Se marca con amarillo los valores anómalos.

ÁREA COSTERAS NORTE

Pozo	Lugar o nombre	Coord X GPS	Coord Y GPS	N.E. (m)	Prof. lectura de C.E. (m)	C.E. (μS/cm)	Observ.
MTP79	Hotel Sugar Beach	341537	273494	Bombeando		273	Muestreo del agua bombeada, pozo en operación, no se mide el N.E.
ILG155	Rancho Amarillo	341690	272540	Bombeando		400	Muestreo del agua bombeada, pozo en operación, no se mide el N.E.
SyL	Frente a rest. Sol y Luna	342141	271776	2.46	3 5.82	379 379	Excavado, sin uso
MTP11	Potrero	341847	272224	3.12	3.12 7.37	385 385	Excavado, sin uso
CM	Potrero	342413	271437	1.16	1.16 5.84	415 415	Carlos Moreno, riego ocasional, excavado
RM	Potrero	342221	271471	1.08	1.08 2.58	473 473	Ronald Moreno, sin uso, excavado, a 100 m de la playa
MTP35	Potrero	343327	270869	3.35	3.35 6.35	373 373	Excavado, uso esporádico
ILG745	Junta Des. Potrero	342504	271476	Sellado		433	Muestreo del agua bombeada
ILG39	Villagio	342810	271512	Sellado		506	Muestreo del agua bombeada
MTP36		343279	271392	5.2	5.2 10.1	465 465	Excavado, sin uso
MTP45	Julio López	343200	271310	2.12		467	Muestreo de agua del tanque almac.
ILG746	Junta Des. Potrero	343376	270293	3.32		364	Muestreo en casa de habitación
MTP91	Soc. Usuarios Agua	343092	270074	Bombeando		359	Muestreo en casa de habitación
MTP32	Flamingo	341375	268967	Aterrado			Continuó salobre, cerca de estero
MTP93	Flamingo			No existe			Cerca de estero
SUDAR1	Potrero	343085	269979	Sellado		353	Muestreo en estación de rebombeo en Flamingo

JCV	Julián Cruz Vallejos	339628	266083	2.15	2.15 3.2	416 416	A 40 m del mar, Brasilito
BRAS	ASADA Brasilito	339731	265987	Sellado		437	Muestreado en casa de habitación
EA	Emiliano Arrieta	339602	265994	1.8	1.8 3.73	580 580	Se reporta N.E. invierno: 0.5 m; N.E. verano: 2.9 aprox, nunca salado
MTP108	Casa Plaza Delancey	337000	264625	1.67	1.67 4.1 9.1 11.1 11.93	377 378 429 453 462	C.E. aumenta linealmente con la prof. a partir de 4.1 m sin mostrar cambios bruscos. Podría deberse a turbiedad y no a intrusión salina. Pozo sin uso, cerca de manglar
MTP107	Casa Plaza Delancey	337127	264379	2.5	2.5 5.16 7.16 9.16 10.16 11.16 11.46	379 382 393 471 523 567 888 ? fondo	C.E. aumenta linealmente con la prof. a partir de 7.16 m sin mostrar cambios bruscos. Podría deberse a turbiedad y no a intrusión salina. Pozo sin uso con sedimento en el fondo, donde muestra muy alta C.E. quizá por enterrado de la sonda en el lodo. Cerca de manglar.
MTP106	Casa Plaza Delancey	336860	264650	Bombea		391	Muestreo en casa de la finca
FPP	Fca. Playa Pelicano	336088	263834	4.87		378	Muestreo en salida de tanque
BP1	Bahía de Los Piratas 1	335023	263304	5.40			Excavado, a 80 m de la calle
BP2	Bahía de Los Piratas 2	335020	263395	0.94	0.94 7.5	318 320	Excavado, cerca de la calle
LM1	Fca. Los Mogotes 1	334967	263467	2.60	3 6.20	1295 1295	A 50 m de la playa, siempre es salobre
LM2	Fca. Los Mogotes 2	335000	263441	1.91	3 4.8	272 272	A 80 m de la playa, se seca en verano

En la zona Costeras Norte no se nota intrusión salina con excepción en los pozos MTP108 y MTP107, en los que aumenta la C.E. con la profundidad. Son pozos sin uso, sin embargo, el MTP106 que está cerca no tiene C.E. alta. La C.E. alta en el MTP108 y MTP107 podría ser debida a condiciones puntuales dentro del pozo. Se podría discernir si se bombean y muestrean.

Además, se nota una clara influencia marina en el pozo LM1, en Playa Real. Pareciera ser un efecto muy local ya que el pozo LM2, ubicado a unos 30 m no muestra este inconveniente.

ÁREA PINILLA

Pozo	Lugar o nombre	Coord X GPS	Coord Y GPS	N.E. (m)	Prof. lectura de C.E. (m)	C.E. (µS/cm)	Observ.
VI66	Tamarindo	333700	252500	--	--	--	Sellado, ahora está el hotel Langosta
EP	Rest. El Pescador	334386	253636	1.75	2.15 3.15 3.25	1098 1425 1432	A 80 de la playa, excavado, riego ocasional
VII09	Hda. Pinilla	336550	250350	2.67			
VII05	Hda. Pinilla	336650	250220	2.84			
VII07	Hda. Pinilla	336730	249980	1.86			
VII03	Hda. Pinilla	336850	249940	2.34			
VII11	Hda. Pinilla	336950	2499875	3.11			
VII24	Hda. Pinilla	336850	249570	2.65			
VII06	Hda. Pinilla	336000	250280	1.58			
HP8	Hda. Pinilla	336050	250470	1.93			
VI-125	Hda. Pinilla	338.000	250.900	2.9			
VI-126	Hda. Pinilla	336.000	250.070	1.42			
VI-123	Hda. Pinilla	336.120	249.570	1.99			
VI-110	Hda. Pinilla	336.320	250.050	1.07			
CO	Hda. Pinilla	335.223	249.170	2.22			Corral
PP	Hda. Pinilla	334.000	249.750	0.1			Papaturro
H4	Hda. Pinilla	335.056	248.397	0.32			Hoyo 4
CB	Hda. Pinilla	334.000	250.500	0.5			Caballeriza
VI - 4	Hda. Pinilla	334.620	248.180	5.74			
SF	Pinilla Valley	339.200	251.350	2.71			Villas S. Fco.
VI - 59	Loc. Hernández	340.151	251.617	1.51			AyA
IV	Israel Vallejo	341.980	252.570	4.0			Lindero
VI - 19	S.J. Pinilla	337.800	249.200	3.91			AyA
SV	Socorro Valle	337.400	245500	0.03			S.J. Pinilla
LV	Leovigildo Valle	339.470	249.059	0.85			Finca
AA	Cebadilla	340.549	248.527	6.5			Antiguo AYA
RV	Rosa Vásquez	341.171	248.418	8.61			Cebadilla
AS	Adina Siles	340500	248600	6.03			

En el área de Pinilla se nota una clara influencia marina en el pozo EP, en Tamarindo. Este pozo se encuentra aproximadamente a 80 m de la playa y a muy poca elevación

ÁREA AVELLANAS - JUNQUILLAL

Pozo	Lugar o nombre	Coord X GPS	Coord Y GPS	N.E. (m)	Prof. lectura de C.E. (m)	C.E. (µS/cm)	Observ.
ML	Cabinas Mauna Loa	335394	246749	3.67	4.4 5.4 6.4 7.4	288 336 408	Estratificación, pero no intrusión
BL	Bar Lolas	335115	245940	5.35		290	Muestreado en salida del tanque
DL	Dos Lunas	335080	245613	1.89	2.07 4.20	329 329	En época lluviosa NE = 0.0 m
RA	Rancho Adelina	335050	245454	2.30	2.5 4.8	314 314	Aprox a 2 msnm, salado en verano. NE en lluviosa= 0.0 m
CL1	Casa en Lagartillo 1	335456	245144	4.02	4.1 5.5 7.5 8.5 10.5 11.5 14.5 15.5 16.5 17.5	277 281 443 459 457 455 460 469 635 fondo	C.E. crece con profundidad pero el pozo está sin limpiar. Podría haber efecto de lodos o sedimentos. Perforado, PVC 152 mm diám.
CL2	Casa en Lagartillo 2	335472	245158	0.6		289	Excavado, muestreado en la casa
MP	Mini super Mapache	335331	244691	con llave		360	Muestreo a la salida del tanque
CA	Casa en Lagartillo	335485	244218	8.68		283	Muestreo en casa
KT	Cabinas Kon Tiki	335526	243342	2.20		318	Muestreo en casa
PP	Casa en Pto. Pargos	335297	243340	4.52		309	Se ha salado en ciertos años
PAL	Casa en Pto. Pargos	335307	243277	3.4	3.5 5.2	338 338	Reportado como salado a veces

CLP	Cabinas Los Pargos	335840	242762	2.97			
VI91	Rancho Playa Negra	335837	242422	3.4	3.5 5.5 5.7	512 519 fondo	Usado ocasionalmente, hay acueducto público. Excavado.
CEA	Cabinas El Almendro	336261	242397	4.11		349	Muestreado en tubería
JP	Casa Finca Paradiso	337075	240920	5.42			Excavado, sin uso
VI156	Jean Paradis	337497	240870	4.35			Perforado, sin uso aún
VI157	Jean Paradis	336828	241091	7.90			Perforado, sin uso aún
MG	Modesto Gutiérrez	337868	239582	2.15			Excavado sin uso. En invierno NE=0
VS	Hotel Villa Serena	338160	238489	2.50			Excavado, parece aguas servidas
CAM	Casa alta de madera	338261	238161	2.59	3.5	473	Excavado, sin uso
HAN	Hotel Antumalal	338270	237901	2.9	3.5 5 6.7	617 617 618	Excavado, sin uso

Hay indicios de intrusión en los pozos CL1 y HAN y se ha reportado condición de salinidad en otras épocas en los pozos RA, PP y PAL.

ÁREA COSTERAS SUR

Pozo	Lugar o nombre	Coord X GPS	Coord Y GPS	N.E. (m)	Prof. lectura de C.E. (m)	C.E. (µS/cm)	Observ.
CV	Venado, pozo comunal	340278	236313	bombea		398	Muestra a la salida del pozo, agua turbia amarillenta
VM	Víctor Matarrita	340120	235405	3.16	3.5 8 8.30	247 237 237	
LA	Lagarto, frente a playa	339472	234689	2.35	2.45 3.75 3.95	313 313 fondo	
EL	Escuela Lagarto	339746	234036	2.77	3.2 3.7 4.0	327 327 fondo	Excavado, sin uso

SX	Sixto Mendoza	342477	229942	2.70			
PM	Playa Marbella	341192	230374	1.1	1.8 2.6 2.8	351 351 fondo	Excavado, uso ocasional
EM	Escuela Marbella	343111	230001	3.7			Excavado, sin uso
PPH	Playa Pitahaya	342620	228283	3.1	3.4 4.6 4.7	348 348 fondo	
CM	Casa Mango	343836	227586	9.44			Excavado, sin uso
EC	Eduardo Cabalceta	345870	225994	4.95		461	Muestra en tubería
FLS	Fca. Los Sueños	347614	223509	2.08			Excavado. En marzo NE=3 m, en octubre NE= 0.0 m.
AZ1	Antonio Zúñiga	348083	221849	2.88	3.18 4.18 4.28	446 446 fondo	Se seca en verano
AZ2	Antonio Zúñiga	348075	221820			508	
ICO	Inés Coba	348323	221602	2.55		436	Muestra en tubería de la casa
PCO	Comunal Ostional	350207	220275			332	Muestra en red
CVU	Lote en Ostional	349899	220197	1.35	1.4 2.3 3.3 3.4	656 657 657 fondo	Excavado, sin bomba, explotación con balde.

Cuadro 4.2 – Elevación del nivel estático en cada pozo considerado para la confección de las líneas equipotenciales.

Fuente: archivo SENARA y mediciones de campo

Pozo	N.E. (m)	Elev (msnm)	Elev. N.E. (msnm)	Notas
MTP88	6	42	36	Sector Potrero
MTP97	5	18	13	
MTP87	8	20	12	
MTP11	8	18	10	
MTP169	5	80	75	
MTP89	12	20	8	
MTP102	5	7	2	
MTP228	4	10	6	
MTP190	13	60	47	
MTP36	10	12	2	
MTP54	3	10	7	
MTP96	4	10	6	
MTP101	9	14	5	
MTP35	5	11	6	
MTP34	3	4	1	
MTP161	3	10	7	
MTP12	8	20	12	
MTP33	8	10	2	Sector Flamingo
MTP32	3	4	1	
MTP125	3	8	5	
MTP56	4	7	3	
MTP123	3	9	6	
MTP120	3	12	9	
MTP58	4	12	8	
MTP153	3	5	2	Sector Brasilito
MTP124	7	10	3	
MTP163	8	15	7	
MTP165	7	22	15	
MTP86	8	10	2	
MTP28	8	10	2	
MTP164	7	35	28	
MTP160	3	10	7	
MTP236	12	80	68	
MTP238	4	80	76	
MTP237	7	120	113	
MTP29	1	10	9	
MTP77	6	5	-1	
MTP323	12	110	98	

MTP14	2	3	1	
MTP18	4	5	1	
MTP132	4	20	16	
MTP243	10	55	45	
MTP130	5	38	33	
MTP129	3	38	35	
MTP8	7	10	3	Sector Conchal
MTP155	4	8	4	
MTP85	7	20	13	
MTP26	7	10	3	
MTP156	6	18	12	
MTP108	2	12	10	Sector Puerto Viejo
MTP107	2	12	10	
MTP37	5	22	17	
MTP152	15	20	5	
MTP231	8	20	12	
MTP151	11	60	49	
MTP178	12	20	8	
MTP235	28	42	14	
MTP119	25	40	15	
MTP241	6	30	24	Sector Playa Real
MTP250	28	80	52	
MTP141	5	60	55	
MTP100	2	12	10	
BP2	1	10	9	
MTP2	9	40	31	Sector Cerro Cabuya
MTP68	4	18	14	
MTP69	4	19	15	
MTP66	3	15	12	
MTP3	5	14	9	
VI109	3	10	7	Sector Pinilla
VI105	3	12	9	
VI124	3	12	9	
VI107	2	10	8	
VI125	3	19	16	
CO	2	28	26	
H4	1	15	14	
CB	1	11	10	
VI4	6	9	3	
VI19	3	18	15	
VI133	3	19	16	
VI123	2	15	13	

VI13	3	18	15	
VI59	5	30	25	
VI28	3	35	32	
VI7	6	35	29	
ML	4	8	4	Sector Icacal a Junquillal
BL	5	11	6	
DL	2	5	3	
RA	2	5	3	
CL1	4	11	7	
CA	9	15	6	
KT	2	14	12	
VI9	7	18	11	
VI121	3	20	17	
VI154	6	12	6	
VI176	3	25	22	
VI155	5	20	15	
VI130	4	25	21	
CLP	3	8	5	
PP	5	6	1	
VI91	3	10	7	
CEA	4	11	7	
JP	5	10	5	
VI156	4	27	23	
VI157	8	10	2	
MG	2	17	15	
VI48	5	20	15	
VI47	3	12	9	
VI150	6	24	18	
VI151	5	25	20	
VI173	16	39	23	
VI152	3	24	21	
VM	3	20	17	Sector Venado a río Cuajiniquil
LA	3	10	7	
EL	3	10	7	
SX	3	10	7	
PM	1	2	1	
EM	4	6	2	
PPH	3	10	7	
CM	9	30	21	
EC	5	23	18	
FLS	2	20	18	
AZ1	3	16	13	

ICO	3	6	3	
CVU	2	5	3	
MA26	20	51	31	
MA9	8	20	12	
MA29	5	40	35	
MA30	8	40	32	
MA21	6	19	13	
MA3	13	20	7	
CJ55	30	55	25	
CJ13	4	20	16	Sector entre ríos Cuajiniquil y Rosario
CJ71	5	18	13	
CJ74	3	20	17	
CJ41	60	68	8	
CJ40	15	70	55	
CJ3	6	40	34	
CJ1	6	30	24	
CJ60	6	20	14	
CJ26	5	20	15	Sector Río Rosario a Ostional
CJ28	98	100	2	
CJ38	30	120	90	
CJ34	25	80	55	
CJ53	40	50	10	
CJ32	13	68	55	
CJ20	28	48	20	
CJ15	10	42	32	
CJ35	23	80	57	
CJ36	40	55	15	
CJ30	6	20	14	
CJ29	6	40	34	

4.3 Parámetros hidráulicos

Se recopiló y analizó la información de pruebas de bombeo de los 17 pozos que contaban con este tipo de información en los archivos del SENARA. En 14 de ellos se presentan datos de tiempo, nivel dinámico y caudal y con ellos se utilizó el método de la línea recta de Jacob para su análisis. En los tres restantes (pozos MTP-100, MTP-123 y MTP-124) sólo se contaba con información del nivel dinámico y del caudal, por lo que la transmisividad se obtuvo por analogía con la capacidad específica.

Cuadro 4.3 – Transmisividades (T) y permeabilidades (k) calculadas de los análisis de las pruebas de bombeo existentes. Datos: SENARA

Pozo	T (m ² /d)	Material acuífero	Espesor (m)	k media (m/d)
BE330	47	Arenas y gravas	22	2.13
CJ15	9	Arenisca, lutita (?), Complejo de Nicoya	90	0.10
MTP100	3	Basalto en almohadilla	28.5	0.10
MTP123	164	Coluvio aluvial	7.9	20
MTP124	463	Coluvio aluvial y basalto fracturado	6.19	74
MTP125	158	Coluvio aluvial y basalto fracturado	90	1.75
MTP127	16	Arenas, gravas, arcillas, basalto	14.5	1.10
MTP128	44	Arenas, gravas, arcillas, basalto	13	3.3
MTP129	59	Arenas, gravas, arcillas, basalto	12.8	4.6
MTP13	5	Basalto sano (de mapa geol)	25	0.2
MTP130	21	Arenas, gravas, arcillas, basalto	12.5	1.7
MTP163	66	Roca alterada, basalto	6.6	10
MTP174	47	Basalto fracturado	64	0.73
MTP93	26	Arenas	4	6.5
MTP97	21	Aluvión	25	0.84
VI66	3	Basalto	9	0.33
VI85	1	-		

El Anexo 4.2 contiene los gráficos de las 14 pruebas de bombeo analizadas mediante el método de la línea recta de Jacob en el cuadro 4.3 se resumen los valores de transmisividad obtenidos, mostrándose también el tipo de material rocoso que forma el acuífero. Al tener el espesor del acuíferos se ha calculado también la permeabilidad media en la columna de la derecha.

Puede verse que los mayores valores corresponden a acuíferos formados en material coluvio aluvial, aluvión o basalto fracturado, o también en una combinación de ellos. Son valores que van del orden de 60 a 460 m²/d. Por el contrario, los acuíferos en basaltos sanos muestran una transmisividad sumamente baja, de menos de 10 m²/d.

No se cuenta con ninguna prueba de bombeo con medidas en un pozo de observación, por lo que no fue posible calcular ningún coeficiente de almacenamiento.

4.4 Modelo conceptual del acuífero y mapa hidrogeológico

Más que un único acuífero, en el área de estudio se cuenta con un sistema acuífero compuesto por acuíferos constituídos en diferentes materiales. Como se mencionó, las unidades litológicas que pueden formar acuíferos son principalmente los depósitos coluviales, los depósitos aluviales y la unidad superior fracturada y más permeable de los basaltos. Estos últimos tienen una presencia importante en aquellas áreas de poca pendiente general y ligeramente onduladas constituídas por esos materiales.

No se encuentran indicios de aislamiento hidráulico entre las unidades acuíferas, las líneas equipotenciales no muestran interrupciones ni discontinuidades al pasar de una unidad a otra por lo que se acepta que existe continuidad entre ellas.

De acuerdo con las líneas equipotenciales, el flujo subterráneo muestra una tendencia general similar a la morfología del terreno, fluyendo de las montañas hacia el mar en la gran mayoría del área. Sin embargo, se identifican algunas líneas de descarga representadas por ríos y quebradas que desvían las líneas de flujo de ese patrón general mencionado, son quebradas y ríos efluentes permanentes o intermitentes. Con base en los datos disponibles no se encuentran ríos o quebradas influentes que se comporten como líneas de recarga a fines de la época seca, que es el tiempo en la que se hicieron muchas de las mediciones.

Esta condición de influencia podría presentarse en la época seca en el caso de que los niveles del agua subterránea descieran por debajo de los lechos de los ríos, y en esas condiciones estos ríos y quebradas, posiblemente secos, se transformarían en líneas de riesgo potencial para la entrada de contaminantes al acuífero.

La pendiente del flujo subterráneo es de cerca de 0.05 (5%) en las áreas de topografía abrupta y puede ser tan baja como 0.007 (0.7%) en las áreas planas de poca elevación como Potrero y Brasilito.

Las transmisividades mayores corresponden a las unidades de coluvio, aluvión y basalto fracturado como es de esperarse, alcanzando valores de entre 60 y 460 m²/d. Los bajos valores de este parámetro, medido en los pozos construídos en basaltos densos comprueban que estas últimas rocas presentan condiciones acuíferas muy limitadas y más bien se comportan como la base de los acuíferos más productores.

En el Anexo 4.3 se incluyen los mapas hidrogeológicos de la zona de estudio, en ellos se muestra una diferenciación de acuíferos, la elevación del nivel del agua subterránea en cada pozo considerado, las líneas equipotenciales, los pozos registrados en el SENARA, y aquellas áreas en las que se ha tenido evidencia de intrusión salina en el pasado o en el presente. La base para la delimitación de estas áreas se comentará más adelante. Por razones de escala, en los mapas de ubicación de los pozos registrados en el SENARA no se ha utilizado la nomenclatura de esa institución, sino que se ha empleado un número equivalente para cada perforación según se detalla en el cuadro 4.4

Los aspectos de calidad del agua serán comentados en el capítulo 7 del presente informe.

Cuadro 4.4 – Equivalencia de nomenclatura en los pozos de los mapas del Anexo 4.3

No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo
1	MTP54	35	MTP96	69	VI87	103	VI99	137	MTP28	171	VI1
2	VI58	36	MTP97	70	MTP132	104	MTP171	138	MTP29	172	VI19
3	MTP55	37	VI66	71	VI81	105	MTP172	139	MTP30	173	VI49
4	MTP56	38	MTP100	72	MTP141	106	MTP173	140	MTP31	174	VI48
5	MTP57	39	MTP101	73	MTP143	107	MTP174	141	MTP32	175	VI47
6	MTP58	40	MTP102	74	VI88	108	MTP175	142	MTP33	176	VI28
7	MTP61	41	CJ1	75	VI89	109	VI100	143	MTP34	177	VI27
8	MTP59	42	MTP106	76	BE330	110	MA3	144	MTP35	178	VI26
9	VI59	43	MTP107	77	CJ3	111	MA4	145	MTP36	179	VI22
10	MTP63	44	MTP108	78	VI91	112	MA5	146	MTP37	180	VI116
11	MTP66	45	MTP109	79	MTP150	113	VI103	147	MTP38	181	MTP50
12	MTP67	46	MTP114	80	MTP151	114	VI104	148	MTP39	182	VI119
13	MTP69	47	VI68	81	MTP152	115	VI105	149	MTP40	183	VI120
14	MTP68	48	VI69	82	VI95	116	VI106	150	MTP41	184	MA8
15	MTP71	49	VI70	83	MTP153	117	VI107	151	MTP42	185	MTP188
16	MTP74	50	MTP119	84	MTP154	118	VI108	152	MTP43	186	MTP189
17	MTP75	51	MTP78	85	MTP1	119	VI109	153	MTP44	187	VI122
18	VI61	52	VI71	86	MTP2	120	VI110	154	MTP45	188	CJ13
19	BE158	53	MTP120	87	MTP3	121	VI111	155	MTP53	189	MTP190
20	MTP77	54	MTP121	88	MTP158	122	VI112	156	MTP18	190	VI123
21	VI60	55	VI80	89	MTP157	123	MTP178	157	MTP46	191	VI124
22	MTP80	56	MTP123	90	MTP156	124	MTP179	158	MTP47	192	VI125
23	MTP79	57	VI82	91	MTP155	125	MTP180	159	MTP48	193	VI126
24	MTP81	58	VI83	92	MTP160	126	MA6	160	MTP49	194	VI127
25	MTP87	59	MTP126	93	CJ4	127	VI114	161	VI14	195	VI130
26	MTP88	60	VI84	94	MTP161	128	MTP8	162	VI13	196	MTP192
27	MTP85	61	VI85	95	MTP162	129	MTP9	163	VI10	197	VI131
28	MTP86	62	MTP124	96	MTP166	130	MTP11	164	VI9	198	VI132
29	MTP89	63	MTP125	97	MTP163	131	MTP12	165	VI8	199	VI133
30	MTP90	64	MTP127	98	MTP164	132	MTP13	166	VI7	200	MA9
31	MTP91	65	MTP128	99	MTP165	133	MTP14	167	VI6	201	GA75
32	MTP92	66	MTP129	100	MTP167	134	MTP25	168	VI5	202	MTP195
33	MTP93	67	MTP130	101	MTP169	135	MTP26	169	VI4	203	MTP207
34	MTP95	68	MTP131	102	VI97	136	MTP27	170	VI2	204	CJ14

No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo	No. en el mapa	Pozo
205	CJ15	239	ILG813	274	VI143	309	VI159	343	MTP308
206	VI136	240	ILG817	275	VI147	310	MTP238	344	MTP307
207	MA20	241	ILG818	276	VI150	311	MTP237	345	MTP306
208	CJ20	242	ILG830	277	VI151	312	MTP236	346	MTP305
209	CJ23	243	ILG831	278	VI152	313	MTP239	347	MA36
210	CJ22	244	ILG832	279	CJ34	314	MTP240	348	VI165
211	CJ21	245	ILG833	280	CJ36	315	MTP241	349	VI168
212	ILG5	246	ILG844	281	CJ35	316	CJ45	350	VI167
213	ILG16	247	ILG845	282	MTP219	317	CJ44	351	MTP314
214	ILG29	248	ILG846	283	MTP218	318	MTP242	352	MTP313
215	ILG39	249	ILG857	284	CJ37	319	MTP243	353	MA37
216	ILG72	250	ILG861	285	MA23	320	MTP244	354	MA38
217	ILG148	252	ILG928	286	CJ38	321	CJ46	355	CJ59
218	ILG152	253	ILG940	287	MTP222	322	MA28	356	VI172
219	ILG155	254	ILG950	288	VI154	323	MA29	357	CJ60
220	ILG622	255	ILG951	289	CJ39	324	MA30	358	CJ61
221	ILG623	256	ILG954	290	MTP226	325	MTP246	359	VI173
222	ILG627	257	CJ25	291	MTP227	326	CJ47	360	MTP320
223	ILG629	258	CJ24	292	MTP228	327	CJ48	361	MTP321
224	ILG634	259	CJ27	293	BE472	328	MTP247	362	CJ63
225	ILG637	260	CJ26	294	CJ41	329	VI160	363	CJ62
226	ILG698	261	MA21	295	CJ40	330	MTP300	364	MTP323
227	ILG699	262	VI139	296	VI155	331	MTP299	365	MTP322
228	ILG700	263	VI140	297	MTP231	332	CJ49		
229	ILG701	264	CJ28	298	MTP230	333	CJ55		
230	ILG702	265	CJ31	299	VI157	334	CJ54		
231	ILG703	266	CJ30	300	VI156	335	CJ53		
232	ILG745	267	CJ29	301	MA24	336	CJ57		
233	ILG746	268	MTP210	302	CJ42	337	CJ56		
234	ILG747	269	MTP211	303	MA26	338	CJ58		
235	ILG753	270	MTP212	304	MA25	339	VI162		
236	ILG754	271	CJ32	306	MTP235	340	VI161		
237	ILG799	272	MTP213	307	MTP234	341	VI163		
238	ILG812	273	VI144	308	CJ43	342	MTP304		

5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS

Se definieron 83 sitios en el campo distribuidos en toda el área de estudio, y en cada uno de esos sitios se llevó a cabo una prueba de infiltración para determinar la permeabilidad del terreno y se recolectaron muestras del suelo para su análisis en laboratorio. Los análisis realizados a las muestras son capacidad de campo, punto de marchitez, porosidad, densidad y granulometría. Los puntos en los que se llevó a cabo esta campaña se muestran en los mapas del Anexo 5.1. En todos los casos se tuvo la consideración de probar y muestrear el terreno natural, evitando las áreas alteradas localmente como las que se encuentran en las inmediaciones de los caminos o las formadas por rellenos artificiales o por movimientos de tierra.

Como se mencionó en un principio, los dos primeros parámetros se realizaron en el laboratorio del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica y los tres restantes en la empresa Geotecnia y Pavimentos S.A. (Geopasa).

Adicionalmente, se hicieron observaciones de la profundidad de raíces, lo cuales fueron hechos por el Ing. Forestal Iván Chaverri. La profundidad de raíces no es un parámetro del suelo estrictamente hablando, pero es una condición de fundamental importancia para llevar a cabo cálculos de recarga.

5.1 Permeabilidad

El método utilizado para las pruebas de infiltración es el del doble anillo, utilizando anillos metálicos con diámetros de 60 cm y de 30 cm aproximadamente. La fotografía 5.1 muestra la disposición de los mencionados anillos para la ejecución de una prueba.



Fotografía 5.1 – Colocación de los anillos concéntricos para la realización de una prueba de permeabilidad sobre el terreno.

La metodología consiste en verter agua en los anillos y medir el tiempo requerido para que el nivel del agua descienda una cantidad determinada. Esta cantidad va de pocos milímetros a 2 cm según el caso. Al descender el agua la cifra determinada se adiciona agua para alcanzar el nivel original y el proceso de medidas se hace de nuevo en lo que se ha llamado otra “lectura”. El tiempo de cada

lectura va decreciendo hasta acercarse o alcanzar un valor constante, señal de que se ha obtenido un estado de saturación, y que por lo tanto la velocidad de infiltración representa la permeabilidad.

En algunos casos la permeabilidad resultó tan baja que en lapsos de hasta 20 ó 30 min el descenso del agua fue de 2 mm ó menos. En estos casos se suspendía la prueba y se reportaba la cifra obtenida en una única medida como un valor máximo de permeabilidad. Las permeabilidades determinadas presentan valores de menores de 0.03 m/día hasta 9.65 m/d; extraordinariamente se obtuvo un resultado de 22.03 m/d en el sitio P03.

El cuadro 5.1 contiene los resultados de las pruebas de permeabilidad además de otros parámetros que se irán mencionando en los párrafos siguientes. El Anexo 5.2 presenta los datos de campo de cada prueba de permeabilidad acompañados por el gráfico correspondiente. No se cuenta con gráfico en aquellos sitios de muy baja permeabilidad en los que solamente se hizo una medición en un largo período de tiempo.

Los valores mínimos de permeabilidad encontrados para cada tipo geomorfológico no parecen presentar ninguna diferencia, pero en los máximos sí parece haber ciertos valores diferenciables tal y como puede verse en el siguiente cuadro.

Rangos de permeabilidad por tipo geomorfológico

Tipo según capítulo 3	Rango de permeabilidad (m/d)
Baja pendiente, plano	< 0.04 a 1.08
Ligera pendiente, plano	< 0.05 a 1.15
Baja pendiente, ondulado	< 0.04 a 4.75
Montañoso	< 0.03 a 9.65

En otras palabras, parece que puede esperarse valores más altos en los sectores montañosos que en los planos y de baja elevación.

5.2 Porosidad, densidad y granulometría

Las muestras para estos tres parámetros se toman en tubos metálicos (Shelby) que se clavan en el terreno a analizar. Luego el tubo se recupera y trae dentro un núcleo de la muestra requerida. Estos tubos tienen un diámetro aproximado de 4 cm y una longitud de 25 cm. Una vez extraídos del terreno, los tubos con la muestra se colocan en bolsas plásticas selladas e identificadas. Además de estos núcleos, es necesario tomar una muestra del material en su estado lo menos alterado posible, lo cual se hace cuidadosamente con una pala y se depositan en bolsas plásticas para su traslado. En la fotografía 5.2 se aprecia el tubo muestreador a medio clavar y en la fotografía 5.3 se ven las muestras mencionadas listas para su envío a los laboratorios.



Fotografía 5.2 - Tubo muestreador a medio clavar Fotografía 5.3 - Muestras empacadas

Los reportes del laboratorio Geopasa, en relación con los análisis de estos tres parámetros se incluyen en el Anexo 5.3, y en las columnas 2 a 5 del cuadro 5.1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

La gran mayoría de las porosidades encontradas están en el rango de 0.44 a 0.60, ocasionalmente se encontraron valores mayores, alcanzando máximos de 0.69.

En relación con la densidad, este parámetro está entre 0.86 g/cm^3 y 1.53 g/cm^3 . La densidad a la que se hace referencia es la conocida como densidad del suelo seco, que es la utilizada en otros cálculos hidrogeológicos que involucran un balance de humedad de suelos.

Las medidas de granulometría se hicieron en aquellas muestras que presentaron menos de un 50% de sus partículas pasando la malla 200. Dicha malla 200 tiene una abertura de 0.075 mm y las partículas que logran pasarla se catalogan como limo o arcilla de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). En otras palabras, las muestras a las que no se les practicó un análisis granulométrico clasifican como limo arcillosas. Los reportes del laboratorio Geopasa en relación con la granulometría se incluyen también en el Anexo 5.3.

5.3 Capacidad de campo y punto de marchitez

Los análisis los llevó a cabo el laboratorio del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Las muestras para la determinación de estos dos parámetros se toman en pequeños anillos metálicos de cerca de 5 cm de diámetro que se clavan en el material a muestrear y que al removerse traen la muestra atrapada en su parte interna. Estas muestras se toman por duplicado e inmediatamente después de tomadas se colocan en bolsas plásticas que se sellan e identifican. La fotografía 5.4 muestra uno de estos anillos conteniendo la muestra de terreno acabada de recolectar.

Cuadro 5.1 – Resultados de las pruebas de permeabilidad y de los análisis de laboratorio

Se asume densidad del agua = 0.997 g/cm³

Sitio	Porosidad (adimens)	Densidad de sólidos (adimens)	Relación de vacíos (adimens)	Densidad suelo seco (g/cm ³)	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitez (%)	Capacidad de campo (mm/m suelo)	Punto de marchitez (mm/m suelo)	Permea- bilidad (mm/min)	Permea- bilidad (m/día)	Tipo
P1	0.55	2.71	1.21	1.22	40.8	35.0	499.2	427.6	< 0.03	< 0.04	3
P2	0.52	2.61	1.09	1.25	47.05	39.74	585.8	494.8	0.75	1.08	4
P3	0.54	2.72	1.16	1.26	30.11	26.31	378.0	330.3	15.3	22.03	4
P4	0.46	2.62	0.86	1.40	50.13	46.26	704.0	649.7	< 0.05	< 0.07	1
P5	0.59	2.65	1.42	1.09	50.94	38.13	556.1	416.3	0.75	1.08	1
P6	0.56	2.74	1.27	1.20	58.89	32.57	708.7	392.0	0.04	0.06	2
P7	0.56	2.72	1.25	1.21	39.66	34.71	478.0	418.3	< 0.05	< 0.07	4
P8	0.65	2.85	1.88	0.99	38.04	35.66	375.3	351.8	0.02	0.03	4
P9	0.69	2.81	2.24	0.86	37.07	31.95	320.5	276.3	0.07	0.10	2
P10	0.52	2.78	1.08	1.33	26.86	17.74	357.9	236.4	< 0.025	< 0.04	1
P11	0.52	2.67	1.09	1.27	35.02	30.95	446.0	394.2	< 0.033	< 0.05	3
P12	0.48	2.8	0.92	1.45	34.74	28.66	505.1	416.7	< 0.033	< 0.05	4
P13	0.53	2.67	1.14	1.24	42.28	11.12	525.9	138.3	0.03	0.04	4
P14	0.52	2.75	1.07	1.32	26.15	22.83	346.4	302.4	1.16	1.67	4
P15	0.55	2.72	1.25	1.21	27.78	21.26	334.8	256.2	4	5.76	4
P16	0.53	2.65	1.14	1.23	42.27	31.9	521.9	393.8	< 0.05	< 0.07	3
P17	0.59	2.86	1.43	1.17	41.18	34.54	483.2	405.3	0.11	0.16	4
P18	0.5	2.6	0.98	1.31	38.6	32.91	505.3	430.9	< 0.06	< 0.09	1
P19	0.59	2.75	1.44	1.12	44.94	24.06	505.0	270.4	0.8	1.15	4
P20	0.52	2.72	1.06	1.32	36.8	34.0	483.8	447.4	< 0.03	< 0.04	1
P21	0.48	2.67	0.91	1.39	25.82	19.42	359.9	270.7	0.8	1.15	2
P22	0.49	2.64	0.97	1.34	46.75	35.88	624.6	479.4	0.1	0.14	2
P23	0.49	2.71	0.97	1.37	33.6	30.8	460.8	422.4	0.1	0.14	3
P24	0.54	2.67	1.18	1.22	41.7	38.8	509.2	473.8	0.4	0.58	3
P25	0.53	2.68	1.12	1.26	30.7	28.3	386.9	356.7	0.1	0.14	4
P26	0.54	2.78	1.19	1.27	47.04	39.41	595.3	498.8	< 0.033	< 0.05	2
P27	0.56	2.75	1.26	1.21	33.55	24.28	407.0	294.6	0.07	0.10	2
P28	0.48	2.66	0.91	1.39	32.5	30.1	451.4	418.6	< 0.05	< 0.07	3
P29	0.57	2.94	1.31	1.27	43.2	39.2	547.9	497.9	< 0.03	< 0.04	4
P30	0.54	2.78	1.16	1.28	36.4	32.7	466.7	420.1	< 0.03	< 0.04	1

Sitio	Porosidad (adimens)	Densidad de sólidos (adimens)	Relación de vacíos (adimens)	Densidad suelo seco (g/cm ³)	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitez (%)	Capacidad de campo (mm/m suelo)	Punto de marchitez (mm/m suelo)	Permea- bilidad (mm/min)	Permea- bilidad (m/día)	Tipo
P31	0.52	2.65	1.09	1.26	33.9	32.4	428.8	409.4	0.13	0.19	3
P32	0.53	2.7	1.13	1.26	41.7	38.4	526.5	485.5	0.17	0.24	4
P33	0.52	2.7	1.06	1.31	36.5	34.7	477.0	453.4	1.1	1.58	3
P34	0.51	2.8	1.05	1.36	44.1	33	600.5	449.4	1.04	1.50	3
P35	0.51	2.75	1.05	1.34	35.7	32.8	477.1	438.4	3	4.32	4
P36	0.56	2.87	1.27	1.26	36.6	29.8	461.5	375.6	0.25	0.36	3
P37	0.54	2.9	1.19	1.32	46.6	39.9	614.6	526.5	0.3	0.43	3
P38	0.56	2.85	1.25	1.26	36.4	30.7	460.3	387.2	5.9	8.50	4
P39	0.45	2.77	0.81	1.53	32.0	30.9	489.0	471.6	0.03	0.04	1
P40	0.5	2.79	1.02	1.38	33.3	27.8	458.3	382.7	< 0.033	< 0.05	3
P41	0.48	2.86	0.93	1.48	28.6	22.2	422.5	328.0	0.18	0.26	3
P42	0.44	2.71	0.79	1.51	14.1	9.2	212.8	138.9	0.38	0.55	3
P43	0.6	2.81	1.5	1.12	54.6	50.5	611.9	565.9	< 0.025	< 0.04	3
P44	0.48	2.72	0.93	1.41	34.5	31.6	485.1	444.4	0.27	0.39	3
P45	0.46	2.74	0.86	1.47	34.5	30.9	506.4	454.3	1.4	2.02	3
P46	0.48	2.64	0.93	1.36	31.8	27.9	433.6	380.0	1.3	1.87	3
P47	0.53	2.81	1.14	1.31	35.4	26.3	462.8	343.8	1.9	2.74	3
P48	0.53	2.84	1.13	1.33	36.7	31.0	487.3	411.6	0.27	0.39	3
P49	0.49	2.63	0.98	1.32	37.3	31.1	494.0	411.6	0.72	1.04	3
P50	0.47	2.79	0.89	1.47	27.7	20.2	407.2	297.0	0.05	0.07	3
P51	0.49	2.79	0.95	1.43	31.7	27.3	451.9	390.0	3.3	4.75	3
P52	0.52	2.78	1.07	1.34	38.9	35.4	521.1	474.3	0.07	0.10	3
P53	0.57	2.82	1.34	1.20	29.8	24.5	357.8	294.2	0.71	1.02	3
P54	0.54	2.87	1.16	1.32	32.4	25.5	428.9	338.4	0.32	0.46	3
P55	0.49	2.84	0.98	1.43	24.2	20.5	346.5	293.9	< 0.06	< 0.09	3
P56	0.51	2.94	1.06	1.42	33.3	30.4	473.8	432.6	0.4	0.58	3
P57	0.56	2.94	1.29	1.28	36.4	34.5	466.3	441.1	< 0.06	< 0.09	3
P58	0.52	2.84	1.09	1.35	28.0	22.8	379.6	308.3	1.76	2.53	4
P59	0.57	2.93	1.31	1.26	39.1	32.7	494.9	413.5	3.4	4.90	4
P60	0.5	2.83	1	1.41	30.0	27.5	423.8	388.2	0.65	0.94	4
P61	0.54	2.74	1.16	1.26	35.7	31.0	451.2	391.7	1.26	1.81	4

Sitio	Porosidad (adimens)	Densidad de sólidos (adimens)	Relación de vacíos (adimens)	Densidad suelo seco (g/cm ³)	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitez (%)	Capacidad de campo (mm/m suelo)	Punto de marchitez (mm/m suelo)	Permeabilidad (mm/min)	Permeabilidad (m/día)	Tipo
P62	0.58	2.89	1.37	1.22	37.8	34.5	459.9	419.2	< 0.033	< 0.05	4
P63	0.52	2.88	1.07	1.39	31.6	26.5	438.4	367.1	< 0.08	< 0.12	3
P64	0.58	2.93	1.38	1.23	38.8	35.1	476.2	430.8	0.15	0.22	4
P65	0.63	3	1.73	1.10	45.9	39.2	502.8	429.1	< 0.03	< 0.04	4
P66	0.55	2.96	1.24	1.32	24.3	18.7	320.1	246.8	0.12	0.17	3
P67	0.54	2.94	1.16	1.36	32.6	26.2	441.8	355.8	0.038	0.05	4
P68	0.55	2.9	1.21	1.31	38.9	33.1	508.7	433.1	0.05	0.07	4
P69	0.46	2.77	0.85	1.49	42.4	36.5	632.7	545.0	0.08	0.12	4
P70	0.58	2.83	1.39	1.18	37.4	33.2	441.8	391.6	0.3	0.43	4
P71	0.59	3.02	1.42	1.24	43.0	37.1	535.4	461.0	0.3	0.43	4
P72	0.55	2.93	1.24	1.30	31.5	26.4	411.0	344.9	1.3	1.87	4
P73	0.58	2.89	1.36	1.22	39.1	31.1	477.5	379.9	0.1	0.14	4
P74	0.5	2.9	0.99	1.45	35.0	27.9	508.3	405.7	1.25	1.80	4
P75	0.63	3.09	1.67	1.15	40.6	32.4	468.0	374.0	2.2	3.17	4
P76	0.57	2.93	1.3	1.27	28.6	23.9	363.1	303.4	4.7	6.77	1
P77	0.53	3.09	1.15	1.43	25.2	20.9	361.4	298.9	0.34	0.49	1
P78	0.65	2.88	1.84	1.01	50.2	43.0	507.4	434.3	6.7	9.65	4
P79	0.52	2.76	1.08	1.32	39.7	33.2	525.8	439.0	< 0.06	< 0.09	3
P80	0.6	2.93	1.52	1.16	41.5	35.8	481.4	414.4	< 0.06	< 0.09	4
P81	0.57	2.91	1.33	1.25	38.3	32.5	476.6	404.5	< 0.02	< 0.03	4
P82	0.59	2.89	1.41	1.20	41.0	36.5	490.6	435.9	0.033	0.05	4
P83	0.62	2.87	1.65	1.08	41.1	36.1	444.0	389.9	0.04	0.06	4

Columnas 2 a 5 : Laboratorio Geopasa

Columnas 6 y 7: Laboratorio CIA-UCR

Columna 10: Pruebas de campo

La columna “**Tipo**” se refiere al tipo geomorfológico según la siguiente nomenclatura:

- 1: Terrenos planos de muy poca pendiente, generalmente asociados con aluviones
- 2: Terrenos planos ligeramente inclinados, generalmente asociados con coluvios
- 3: Terrenos de baja pendiente pero con cierta ondulación, generalmente originados por planicies de basalto
- 4: Morfología abrupta, pendiente fuerte, sector montañoso dominado por rocas del Complejo de Nicoya



Fotografía 5.4 - Anillo de muestreo con la muestra contenida en él para el análisis de la capacidad de campo y del punto de marchitez.

Los rangos de capacidad de campo determinados van de 14.1% (sitio P42) a 58.89% (sitio P6) y los puntos de marchitez van de 11.12% (sitio P13) a 46.26% (sitio P4).

El laboratorio del CIA reporta los valores de capacidad de campo y punto de marchitez en términos de porcentaje. Para expresar estos valores en términos de mm de agua en cada metro de suelo se multiplica el valor en porcentaje por la densidad del suelo seco. Estas unidades de mm de agua por metro de suelo son las que se utilizan más frecuentemente en los balances de humedad de suelos empleados en los cálculos de recarga a los acuíferos.

En el cuadro 5.1 se presentan los valores tanto en porcentaje reportados por el laboratorio (columnas 6 y 7) como en mm por metro de suelo (columnas 8 y 9).

5.4 Profundidad de raíces

La diferenciación de sectores según la profundidad de raíces de la vegetación se hizo con base en el análisis de fotografías aéreas tomadas en el año 1997, que son las más recientes con las que se cuenta, apoyado en observaciones de campo. Se definieron tres categorías de vegetación:

- Potreros y uso agrícola: con profundidad de raíces de 5 cm a 30 cm
- Charrales y bosques secundarios: profundidad de raíces entre 20 cm y 60 cm
- Bosques: raíces entre 55 cm y 100 cm

6. EVALUACIÓN GEOFÍSICA

La finalidad primordial de la evaluación geofísica fue la de tratar de visualizar la posición de la interfaz entre el agua dulce y el agua salada en los sectores costeros. Adicionalmente, los resultados de esta actividad se utilizaron para obtener información adicional o confirmar las condiciones geológicas en ciertas localidades.

La técnica empleada fue la de resistividad eléctrica, y se llevaron a cabo 68 sondeos eléctricos verticales (SEVs) con la configuración Schlumberger y con aberturas de AB/2 de 100 m. La ubicación general de cada sitio se muestra en los mapas del Anexo 5.1 y en el Anexo 6.1 se presenta el informe técnico preparado por Ingeofica Dos Mil S.A., firma que hizo los sondeos y su interpretación. Para cada sitio en ese anexo se da también las coordenadas, un modelo de la interpretación de los resultados, la curva Resistividad Aparente contra AB/2, un cuadro con los datos de campo y una imagen con la ubicación.

La campaña de geofísica vino a confirmar que en términos generales, los materiales meteorizados y fracturados se encuentran a menos de 10 metros de profundidad, y estos son los que forman las principales unidades acuíferas. Además, en algunos sondeos cercanos a las costas se detectaron capas muy conductoras que se relacionan con la presencia de agua salina.

La relación entre los resultados obtenidos de la Geofísica y la probable intrusión de agua marina será discutida en el capítulo 7.

7. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y POSIBLE INTRUSIÓN SALINA

Para analizar el tema de la calidad del agua, y enfocando el interés en el aspecto de la intrusión salina se recopilaron los análisis físico químicos de aguas de pozos existentes en los archivos del SENARA y se hizo una campaña de medición de la conductividad del agua en varios pozos.

En los archivos del SENARA se encontraron 41 pozos con alguna información de análisis de aguas. En el cuadro 7.1 se presenta un resumen de estos análisis para cada pozo con datos.

En la generalidad de los pozos la concentración de cloruros está por debajo de los 23 mg/l, valor que se asume sin influencia de la intrusión salina y aunque no existe una relación clara entre la conductividad eléctrica y la concentración de cloruros, se ha tomado un valor de conductividad eléctrica de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como el umbral a partir del cual podría haber manifestación de la intrusión salina.

En los análisis del SENARA se detecta una concentración más alta de cloruros en los pozos MTP32, MTP93, MTP97 y VI66 y que se sale del patrón que presentan los pozos restantes. Mediante campañas de campo se intentó visitar estos pozos con más altos valores de cloruros, los resultados de las observaciones se mencionan a continuación.

- El pozo MTP32 ya no existe, pero los propietarios del lugar señalan el punto en el que estaba ubicado. Se trata de un punto localizado en el sector de Flamingo en las cercanías de un área

que es invadida regularmente por el agua del mar durante las mareas más altas. Los propietarios del terreno indican que el pozo siempre presentó agua salada y por eso se abandonó. Los datos de calidad del agua del SENARA datan del año 1977.

- El pozo MTP93 se reporta en el sector sur de Playa Blanca (Flamingo) en las cercanías de un manglar pero los cambios de infraestructura que se han dado en el sitio desde el año 1992, fecha de la información del pozo, no permitió localizarlo. Es posible que ya no exista.
- El pozo MTP97 se reporta en el hotel Sugar Beach, en playa Pan de Azúcar. Se identificó el pozo en el campo y se midió la conductividad eléctrica, la cual resultó ser de 273 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondiente a aguas sin ningún efecto de intrusión. Exista la posibilidad de que cuando se hizo el análisis en julio de 1992 se tuvieran algunas condiciones extraordinarias que elevaron los cloruros a 121 mg/l y la conductividad a 1350 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, debió ser un efecto pasajero, ya que es el pozo que abastece al hotel y no se reportan inconvenientes en la calidad de su agua. Otra posible causa de estos valores tan diferentes puede ser que en 1992 se muestreara otro pozo y la confusión no haya sido aclarada.
- El pozo VI66 reporta el valor más alto de cloruros (3672 mg/l). El pozo ya no existe y estaba ubicado donde hoy día se encuentra el hotel Langosta en Tamarindo. Personal de mantenimiento del hotel indicó que efectivamente el pozo era salado y por esa razón se clausuró. La elevación del terreno es de aproximadamente 12 msnm y el pozo tenía una profundidad de 18 m, estaba colocado en una franja ancha de terreno limitada por el océano Pacífico el oeste y por el estero San Francisco al este y al sur.

En la campaña de medición de la conductividad eléctrica en varios pozos llevada a cabo durante el presente estudio se hicieron medidas en 52 pozos. En 28 pozos se dieron las condiciones para hacer un registro de la variación de la conductividad eléctrica con la profundidad. Esos pozos eran del tipo excavado o fueron construidos con máquina perforadora pero no tenían ningún equipo de bombeo instalado. El registro se hizo con el empleo de un conductímetro portátil propiedad del SENARA con una sonda larga que era introducida en el pozo. En los 24 pozos restantes se midió la conductividad en el agua extraída.

Los resultados de estas mediciones se muestran en el cuadro 4.1 (sub capítulo 4.2). En aquellos casos en los que fue posible levantar un perfil de conductividad se indican las profundidades a las que fueron hechas las mediciones.


En estas mediciones de campo se identificaron 8 pozos con posible intrusión salina, ocurrida en el presente o en fechas pasadas. Estos pozos son:

- Pozo LM1, ubicado en Playa Real, a unos 50 m de la playa y a una elevación de aproximadamente 3 msnm. Aquí se encontró una conductividad de 1295 $\mu\text{S}/\text{cm}$ desde su nivel estático, valor que se mantuvo hasta el fondo del pozo a 6.20 m de profundidad. Este pozo se reporta salobre durante todo el año.

Cuadro 7.1 – Resumen de los análisis físico químicos en los pozos del archivo de SENARA
 Parámetros relevantes a la intrusión salina. Valores en mg/l excepto pH y C.E. (conductividad eléctrica)

Pozo	pH	C.E.	Sulfatos	Cloruros	Bicarbonatos	Magnesio	Calcio	Dureza total	Sól. tot. dis.	Fecha
		μS/cm								
BE158	7.5	220	25.8	4.5	243.8	21.6	48	210		Mar-77
CJ15	6.39	285	15.8	1.8	165	20.7	30.9	163		Oct-03
MTP01	6.5	310	48	12.4	187.7	14.2	38	190	259	Abr-74
MTP02	6.71	280	5.8	6.5	161.5	10.9	38	140.5	140	Ago-74
MTP03	6.5	340	6.7	14.2	170.7	15.6	40	165	160	Ago-74
MTP100	6.96	405	10	13.8		23.4	49	220	380	Nov-93
MTP11		320	38.4	3.5	182.3	13.4	35.2	144		Mar-73
MTP127	6.12	193		5	77.2	6.6	4.1	37.6		May-95
MTP128	6.35	193		5	78.4	7	5.6	43		May-95
MTP129	6.4	189		5	78.4	4.6	4.3	30.1		May-95
MTP130	6.25	189		5	76	4.6	5.2	32.2		May-95
MTP160	6.84	261	6.6	5.4	190.5	16.5	36.6	160		Ago-04
MTP163	6.57	342	8.8	6	248.7	22.2	51.8	222		Ago-04
MTP179	5.85	341	6.5	4.6						Ene-00
MTP18	6.7	280	19.2	3	158.5	14.4	30	135		Feb-76
MTP25	8	200	28.8	8	259.7	28.1	31.2	195		Mar-77
MTP26	7	160	43.2	18	225.6	25.9	34.8	195		Mar-77
MTP27	8	180	57.6	10	235.3	34.1	29.2	245		Mar-77
MTP28	7	140	33.6	14.5	158.5	23.5	24.8	160		Mar-77
MTP31	6.5	140	52.8	6.5	213.4	27.8	35.6	205		Mar-77
MTP32	7.8	625	67.2	248.5	402.3	72	168	720		Mar-77
MTP33	7	140	24	8	237.8	13.7	51.2	185		Mar-77
MTP34	7.5	160	57.6	8	225.6	29.8	36.4	215		Mar-77
MTP35	7.5	140	57.6	5	197.5	24	36	190		Mar-77
MTP36	8	140	48	6	220.7	11	31.6	125		Mar-77
MTP38	7.5	220	38.4	22.5	219.4	28.8	40	220		Mar-77
MTP39	8	340	43.2	6	286.5	32.4	52	260		Mar-77

Pozo	pH	C.E. μS/cm	Sulfatos	Cloruros	Bicarbonatos	Magnesio	Calcio	Dureza total	Sól. tot. dis.	Fecha
MTP42	7.8	220	38.4	4.5	231.6	24	46	215		Mar-77
MTP43	8.25	180	28.8	4.5	195.1	19.2	36	170		Mar-77
MTP44	7.95	240	28.8	6.5	274	24	54	235		Mar-77
MTP45	7.65	180	43.2	9.5	207.3	22.8	36	185		Mar-77
MTP89				2.2						Sep-92
MTP93	7.15	740	9	91	240	31	40	230	450	Ago-92
MTP97	6.76	1350	20	121	250	52	60	368	840	Jul-92
VI04	6.8	318	24	7.8	182.8	15.6	30	140	128.4	Mar-73
VI05	6.7	276	28.8	7	137.7	7.2	32	110	111.3	Mar-73
VI06	6.95	254	43.2	6.8	154.2	13.2	28	125	102.7	Mar-73
VI14	6.7	260	19.2	5.8	154.2	11.5	27.2	116	190	Mar-74
VI19	8.5	275	9.6	4.9				160		Ene-76
VI66				3672						Ene-93
VI8	7.22	400	7.7	4.9	140.2	13	24.8	116		Mar-80

 *Amarillo significa valores altos anómalos*

- Pozo EP, localizado en el restaurante El Pescador en Tamarindo. Este pozo es del tipo excavado, con una profundidad de 3.25 m y con un nivel estático de 1.75. La elevación del terreno es de aproximadamente 2 msnm y el pozo está a 80 m de la playa aproximadamente. Se usa ocasionalmente para riego.
- Pozo CL1, ubicado en una casa en Lagartillo. Es del tipo perforado, con una profundidad de 17.5 m y con un nivel estático de 4.02. La elevación del nivel estático es de 7 msnm y registra valores de 277 $\mu\text{S}/\text{cm}$ cerca del nivel estático. La conductividad va aumentando con la profundidad de manera que cerca del fondo llega a 635 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, al descender la sonda al fondo se nota la presencia de sedimentos suaves y la conductividad se eleva a 1190 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El pozo no ha sido limpiado por la constructora después de su finalización, y se presume que las variaciones en conductividad se deben a la presencia de lodos más que a intrusión del agua de mar, sobre todo considerando que se encuentra a 500 m de la costa.
- Pozo RA, ubicado en el Rancho Adelina, sector sur de playa Avellanas. Se midió una conductividad de 314 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor que no indica intrusión marina, pero se reporta que se torna salado en la época seca.
- Pozo PP, en Punta Pargos. Al igual que en el anterior, el valor de conductividad no indica ninguna amenaza de intrusión (309 $\mu\text{S}/\text{cm}$) pero se reporta hace aproximadamente 4 años su agua se había salado.
- Pozo PAL, también en Punta Pargos, en una casa de habitación. De igual manera, se indica que se ha mostrado salado en algunas épocas en el pasado, aunque en el momento de la medida no había indicios de salinidad (337 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a lo largo de toda su columna de agua. La profundidad del pozo es de 5.9 m.
- Pozo HAN, este pozo está localizado en terrenos del Hotel Antumalal, el cual tenía sus instalaciones sin uso y en estado casi de abandono. El pozo está aproximadamente a 100 m de la costa y la conductividad eléctrica se manifestó a más de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ desde el nivel estático. El pozo es excavado y no se encuentra en uso.
- Pozo CVU, pozo localizado en Ostional a unos 70 m de la playa. Es del tipo excavado y aunque no se encontró a ninguna persona, se vio un balde con una cuerda que hace pensar que se usa ocasionalmente a un caudal muy bajo. Presentó valores de 656 $\mu\text{S}/\text{cm}$ desde su nivel estático.

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos de los sondeos eléctricos verticales que se hicieron fue el tratar de determinar la presencia de agua salada en los acuíferos de la zona costera. En diez de los SEVs ejecutados se detectaron deflexiones de la curva de resistividad que pueden atribuirse a la presencia de agua salada. Las principales condiciones de esos sitios se resumen en el cuadro 7.2.

Debajo del agua salada parece haber agua dulce pues la resistividad aumenta, sin embargo, esto se atribuye al hecho de que esta alta resistividad se debe a la roca sana poco permeable.

Cuadro 7.2 – Resumen de los sitios de SEVs en los que se identifica la probable interfaz entre el agua dulce y la salada

Sondeo	Ubicación del agua salina (mbns)	Lugar	Distancia aproximada a la costa (m)
S1	2 a 4	Potrero	150
S2	3 a 10	Potrero	150
S3	15 a 23	Flamingo	500
S4	4 a 8	Brasilito	40
S5	8 a 18	Brasilito	200
S7	7 a 20	Brasilito	40
S13	5 a 8	Flamingo	100 de manglar
S17	20 a 35	Tamarindo	220
S23	13 a 16	Flamingo	300
S24	5 a 9	Brasilito	150

Como puede verse, estos sondeos que presentan un probable efecto del agua salada se encuentran en los sectores de Potrero, Flamingo y Brasilito. En el área de Flamingo ya el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (1989) había identificado un área con intrusión salina comprobada, la cual se manifestaba a través de dos pozos que se encontraban en operación para el abastecimiento del acueducto local. Esos pozos fueron sustituidos y hasta donde fue posible conocer, no se encuentran en operación en la actualidad.

En los mapas hidrogeológicos del Anexo 4.3 se indican las áreas en las que se ha detectado la intrusión salina o en las que se infiere esta condición a través de los sondeos geofísicos.

8. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN

Para cuantificar la vulnerabilidad de los acuíferos se utilizó la metodología G.O.D. propuesta por Foster y otros (2000), la cual considera tres aspectos físicos y de las condiciones del acuífero: profundidad al nivel estático, tipo de material de cobertura y grado de confinamiento. A cada uno de esos elementos le asigna un sub índice y el producto de esas tres cifras representa el índice de vulnerabilidad del acuífero en cierto sector. A partir de los valores finales así obtenidos se define una de cinco categorías de vulnerabilidad: extrema, alta, media, baja y despreciable.

En el cuadro 8.1 se indican los factores involucrados en el análisis de la vulnerabilidad y los sub índices que se aplican a cada factor dependiendo de las condiciones específicas de cada sitio.

A fin de calcular la vulnerabilidad a la contaminación se tomó en cuenta la información de cada pozo registrado en el SENARA para conocer las condiciones de los tres parámetros mencionados. Los datos fueron tomados de la información de los pozos que se presentó en el Anexo 4.1.

Cuadro 8.1 – Factores del análisis de la vulnerabilidad en el método G.O.D. Según Foster y otros (2000)

Factor	Condición	Sub índice
Prof. al nivel estático	Menor a 5 m	0.9
	mayor de 5 y menor de 20 m	0.8
	mayor de 20 y menor de 50 m	0.7
	mayor de 50 m	0.6
Material de cobertura	Gravas coluviales	0.8
	Lavas fracturadas	0.8
	Arenas aluviales	0.7
	Suelos residuales, arcillas	0.4
Grado de confinamiento	No confinado	1.0
	No confinado cubierto	0.6
	Semi confinado	0.4
	Confinado	0.2

Las categorías de vulnerabilidad a la contaminación se definen en el cuadro 8.2.

Cuadro 8.2 – Categorías de vulnerabilidad y definición correspondiente (Foster y otros, 2000)

Índice resultante	Categoría	Vulnerables a contaminantes:
menor a 0.1	despreciable	si hay capas confinantes, percolación insignificante
mayor a 0.1 y menor a 0.3	baja	contaminantes conservativos descargados o lixiviados amplia o continuamente por largo tiempo
mayor a 0.3 y menor a 0.5	media	contaminantes descargados o lixiviados continuamente
mayor a 0.5 y menor a 0.7	alta	que no son fuertemente absorbidos o transformados.
mayor a 0.7	extrema	mayoría de contaminantes con impacto rápido

En el cuadro 8.3 se presenta la información del Anexo 4.1 que tiene alguna relación con el análisis de la vulnerabilidad. En ese cuadro se han agregado algunas columnas para cuantificar los sub índices de vulnerabilidad. En el caso de los pozos que contaban con datos de esos tres parámetros se calculó el índice de vulnerabilidad resultante en ese mismo cuadro y se hizo una diferenciación con colores de los resultados finales para simplificar la visualización.

La profundidad al nivel estático y el tipo de material de cobertura fueron leídos directamente de la información de cada pozo. La definición del grado de confinamiento se hizo tomando en cuenta la posición relativa entre el nivel estático y la base de una eventual capa arcillosa superficial. El tipo de condición se definió de la siguiente manera.

- Acuífero no confinado: si el material de cobertura es permeable (arenas, lavas fracturadas, gravas, aluviones).
- Acuífero no confinado cubierto: si existe una capa arcillosa superior pero el nivel del agua se encuentra en una unidad permeable subyacente.

- Acuífero semi confinado: si hay una capa poco permeable superior formada por mezclas de arcillas y arenas, o limos y arenas, o fragmentos rocosos y arcillas. Generalmente los reportados como coluvio llevan esa categoría.
- Acuífero confinado: si existe una capa arcillosa superior y el nivel del agua se encuentra por encima de la base de esa capa de baja permeabilidad (nivel piezométrico).

Con base en la información presentada en el cuadro 8.3 se procedió a elaborar los mapas de vulnerabilidad a la contaminación para cada sector de estudio de la siguiente manera.

Primero se produjo un mapa de zonificación de la profundidad al nivel estático según los rangos mencionados en el cuadro 8.1. Para ello se colocaron sobre un mapa los puntos de cada pozo con esta información y se interpolaron los valores para definir los sectores por rango.

Como segundo paso se hizo un mapa de sectores de material de cobertura según los rangos mencionados en el cuadro 8.1. Esto significa que cada mapa quedó zonificado en tres categorías.

Como paso siguiente, se produjo un mapa de zonificación según el grado de confinamiento. Se utilizaron las cuatro categorías que se señalan en el cuadro 8.1.

Una vez que se tuvieron esos tres mapas, se procedió a sobreponerlos y a calcular para cada punto el índice de vulnerabilidad correspondiente mediante la multiplicación de los tres sub índices. De esa multiplicación resultó el mapa de vulnerabilidad a la contaminación para cada cuenca de estudio, pero considerando que la densidad de información no es alta se decidió agrupar las categorías “baja” y “despreciable” en la categoría “baja”. De esta manera, solo se muestran cuatro categorías. Esos mapas de vulnerabilidad se incluyen en el Anexo 8.1 y en el Anexo 8.2 se presentan los tres mapas intermedios mencionados en los párrafos anteriores y que se hicieron para cada cuenca de estudio.

Durante la preparación de esos mapas se encontró que hay sectores muy consistentes en su categoría de vulnerabilidad, y muchos pozos cercanos producen el mismo resultado, pero también se vio que pueden presentarse cambios fuertes en distancias cortas. Aparte de esto, debe tenerse en mente que la precisión de los mapas de este tipo será mayor cuanto más densa y confiable sea la información básica sobre la que están apoyados. La mayoría de la información se concentra actualmente en las zonas más cercanas a la costa, mientras que en los sectores montañosos no se cuenta con pozos que den referencias completas, o simplemente no existen pozos, haciéndose necesario la extrapolación de la información y la suposición de ciertas condiciones.

Los autores del método G.O.D. claramente indican que *“Los mapas de vulnerabilidad de acuíferos fueron concebidos solamente para dar una primera indicación general del peligro de contaminación potencial del agua subterránea.”*, *“... estos mapas involucran muchas simplificaciones referidas a las variaciones geológicas y procesos hidrogeológicos, ambos naturalmente complejos. Además, los problemas puntuales específicos necesitan ser resueltos por investigaciones puntuales específicas...”* (Foster y otros, 2002, pág. 33). Por eso no es de esperarse, entre otras cosas, que las líneas que separan los distintos sectores de vulnerabilidad sean definitivas ni que esas líneas no puedan ser variadas conforme se cuente con mayor información detallada de un punto en particular.

Cuadro 8.3 – Definición de la categoría de vulnerabilidad en cada sitio de pozo con información

POZO	X	Y	NIVEL ESTÁTICO		MATERIAL DE COBERTURA		CONFI NADO		ÍNDICE G.O.D.	CATEGORÍA VULNERAB
			Prof (m)	Sub índice	Material	Sub índice	Sí / No	Sub índice		
BE-330	345300	272000	8	0.8	ARENAS Y GRAVAS	0.8	NO	1	0.64	Alta
CJ-1	346300	224300	6	0.8	N.I.		N.I.			
CJ-13	345500	226500	4	0.9	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
CJ-15	348510	221750	10	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
CJ-20	349060	222550	28	0.7	ARCILLA Y ARENA	0.4	Cubierto	0.6	0.168	Baja
CJ-22	350290	224645	17	0.8	BASALTO	0.8	NO	1	0.64	Alta
CJ-23	350420	224610	7	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
CJ-26	348495	224578	5	0.9	ALUVIÓN SUELO	0.8	NO	1	0.72	Extrema
CJ-27	350800	225663	3	0.9	VEGETAL	0.4	Cubierto	0.6	0.216	Baja
CJ-28	349610	223562	98	0.6	ARCILLA Y BASALTO	0.4	Semi conf	0.4	0.096	Despreciable
CJ-29	349610	220825	6	0.8	BASALTO	0.8	NO	1	0.64	Alta
CJ-3	346875	224550	6	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
CJ-30	349513	220945	6	0.8	BASALTO	0.8	NO	1	0.64	Alta
CJ-32	349025	222670	13	0.8	BASALTO	0.8	NO	1	0.64	Alta
CJ-34	348547	223253	25	0.7	BASALTO	0.8	NO	1	0.56	Alta
CJ-35	350942	222132	23	0.7	ARCILLA ARENOSA	0.4	Semi conf	0.4	0.112	Baja
CJ-36	350761	222038	40	0.7	BASALTO	0.8	NO	1	0.56	Alta
CJ-38	348880	223653	30	0.7	BASALTO	0.8	N.I.			
CJ-40	347710	225100	15	0.8	ARCILLA Y REGOLITA	0.4	Cubierto	0.6	0.192	Baja
CJ-41	347650	225700	60	0.6	ARCILLA Y REGOLITA	0.4	Cubierto	0.6	0.144	Baja
CJ-43	346725	223640	12	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable

CJ-44	352000	225000	21	0.7	ARCILLA Y LUTITA	0.4	SI	0.2	0.056	Despreciable
CJ-45	357200	224200	17	0.8	ARCILLA Y LUTITA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
CJ-46	348941	222507	60	0.6	ARCILLA Y BASALTO	0.6	NO	1	0.36	Media
CJ-53	348550	222608	40	0.7	N.I.		N.I.			
CJ-55	344875	227502	30	0.7	ARCILLAS Y LIMOS	0.4	SI	0.2	0.056	Despreciable
CJ-56	345333	231083	3	0.9	ARCILLAS Y LIMOS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
CJ-57	345752	231196	8	0.8	ARCILLAS Y LIMOS	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
CJ-60	347004	223532	6	0.8	SUELO ARCILLOSO	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
CJ-71	345775	226675	5	0.9	N.I.		N.I.			
CJ-74	345530	225726	3	0.9	N.I.		N.I.			
CJ-76	345705	225913	9	0.8	N.I.		N.I.			
GA-75	352550	219800	6	0.8	N.I.		N.I.			
MA-21	342736	229077	6	0.8	ARENISCA	0.8	NO	1	0.64	Alta
MA-23	342550	230450	25	0.7	ROCAS Y ARCILLAS	0.8	SI	0.2	0.112	Baja
MA-26	341260	234800	20	0.8	BASALTOS, LIMO Y ARCILLAS	0.8	Semi conf	0.4	0.256	Baja
MA-29	342241	231628	4.5	0.9	COMPLEJO DE NICOYA	0.8	NO	1	0.72	Extrema
MA-3	343900	227175	13	0.8	ARCILLA Y BASALTO	0.8	Semi conf	0.4	0.256	Baja

MA-30	342195	231413	8	0.8	SUELO LIMO / ARCILLOSO	0.4	Cubierto	0.6	0.192	Baja
MA-37	344620	226650	6	0.8	ARENISCA	0.8	NO	1	0.64	Alta
MA-4	344000	227190	8.5	0.8	ARENA	0.7	NO	1	0.56	Alta
MA-9	339950	232900	8	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-1	N.I.	N.I.	4	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-100	335000	263400	1.95	0.9	SUELO VEGETAL	0.4	NO	1	0.36	Media
MTP-101	343800	270850	9	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-102	342400	271725	7	0.8	SUELO LIMO- ARENOSO	0.4	Semi conf	0.4	0.128	Baja
MTP-11	341900	272100	8	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-114	336250	263850	8.7	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-119	336700	263940	25	0.7	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.056	Despreciable
MTP-12	343700	269700	8	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-120	341180	268500	3	0.9	ARENAS	0.8	NO	1	0.72	Extrema
MTP-123	341400	268700	3.1	0.9	SUELO LIMOSO	0.4	Semi conf	0.4	0.144	Baja
MTP-124	340800	267150	6.8	0.8	LIMO- ARENOSO	0.7	NO	1	0.56	Alta
MTP-125	341300	268850	2.9	0.9	SUELO LIMO- ARENOSO	0.7	NO	1	0.63	Alta
MTP-127	340800	264800	5.5	0.8	ARENAS, GRAVAS Y ARCILLAS.	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-128	340820	264650	3	0.9	ARENAS, GRAVAS Y ARCILLAS.	0.8	NO	1	0.72	Extrema
MTP-129	340650	264500	3.2	0.9	ARENAS, GRAVAS Y ARCILLAS.	0.8	NO	1	0.72	Extrema

MTP-13	339900	265500	5	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-130	340450	264360	5.5	0.8	ARENAS, GRAVAS Y ARCILLAS.	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-132	340450	265500	4	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-14	339800	265900	2	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-141	335250	262950	4.4	0.9	ARCILLA CON FRAGMENTOS DE ROCA	0.4	Semi conf	0.4	0.144	Baja
MTP-150	337300	263800	10.2	0.8	ARCILLA Y ARENAS, ALUVIÓN	0.8	SI	0.2	0.128	Baja
MTP-151	337825	263525	11.4	0.8	ARCILLAS Y ARENAS	0.8	Semi conf	0.4	0.256	Baja
MTP-152	337320	263925	15	0.8	ARCILLAS Y ARENAS	0.8	Semi conf	0.4	0.256	Baja
MTP-153	340250	267100	3	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-155	339200	264980	4.13	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-156	338850	264330	5.5	0.8	ARCILLAS Y LIMOS	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-157	337300	264590	3.4	0.9	ARCILLAS Y LIMOS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-158	337500	264400	3.4	0.9	ARCILLAS Y LIMOS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-160	340800	266675	3.2	0.9	ROCA ALTERADA	0.8	NO	1	0.72	Extrema
MTP-161	342750	270050	2.5	0.9	MATERIAL ARCILLOSO	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable

MTP-163	341050	267150	8.4	0.8	SUELO ARENO- ARCILLOSO	0.7	Cubierto	0.6	0.336	Media
MTP-164	341525	266800	6.8	0.8	ROCA ALTERADA	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-165	341100	267300	7.07	0.8	ROCA ALTERADA	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-169	342300	272400	5	0.9	ARENAS Y GRAVAS	0.8	NO	1	0.72	Extrema
MTP-173	334371	261694	9.8	0.8	SUELO LIMO- ARENOSO	0.4	Cubierto	0.6	0.192	Baja
MTP-174	334893	261161	5.9	0.8	SUELO SUELO	0.4	NO	1	0.32	Media
MTP-178	337100	263650	12	0.8	VEGETAL	0.4	NO	1	0.32	Media
MTP-179	340871	265036	5.5	0.8	COLUVIO	0.7	NO	1	0.56	Alta
MTP-18	339850	265800	4	0.9	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-180	341015	264924	5.6	0.8	COLUVIO	0.7	NO	1	0.56	Alta
MTP-188	340940	267100	9	0.8	ARENAS Y GRAVAS	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-189	341900	272250	31	0.7	COMPLEJO DE NICOYA Y REGOLITA	0.7	Cubierto	0.6	0.294	Baja
MTP-190	343000	272850	13	0.8	MATERIALES GABROICOS./ SUELO ARCILLOSO	0.4	Cubierto	0.6	0.192	Baja
MTP-192	340250	264600	13	0.8	SUELO VEGETAL	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-195	341075	268025	23	0.7	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.056	Despreciable
MTP-2	333500	260900	9.3	0.8	ROCA	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-207	334400	262700	1.5	0.9	COLUVIO- ALUVIONAL	0.7	NO	1	0.63	Alta

MTP-210	344400	268000	3	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-211	343500	268400	7	0.8	ARCILLAS Y BLOQUES BASÁLTICOS	0.4	Semi conf	0.4	0.128	Baja
MTP-212	344000	268500	9	0.8	ARCILLAS Y BLOQUES BASÁLTICOS	0.4	Semi conf	0.4	0.128	Baja
MTP-213	341250	265400	8	0.8	SUELO VEGETAL./ LAHARES DE ROCA	0.4	Cubierto	0.6	0.192	Baja
MTP-226	336810	264000	5	0.9	SUELO ARCILLOSO	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-227	342466	271677	4	0.9	SUELO ARCILLOSO	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-228	342485	271776	4	0.9	SUELO ARCILLOSO	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-230	337470	263970	5	0.9	SUELO	0.4	Cubierto	0.6	0.216	Baja
MTP-231	337825	263875	8	0.8	SUELO	0.4	Cubierto	0.6	0.192	Baja
MTP-235	336964	263382	28	0.7	SUELO. / COMPLEJO DE NICOYA	0.7	Cubierto	0.6	0.294	Baja
MTP-236	342200	266350	12	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-237	342500	266550	7	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-238	341720	266550	4	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-241	335693	263545	6	0.8	ARENA	0.7	NO	1	0.56	Alta
MTP-242	341200	265555	20	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-243	341260	265710	10	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-244	343933	271716	5	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-25	339510	265700	3	0.9	N.I.		N.I.			

MTP-250	335690	263364	28	0.7	LUTITAS	0.8	NO	1	0.56	Alta
MTP-26	338500	264900	7	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-27	339600	266150	3	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-28	340000	266800	8	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-29	340750	266250	0.5	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-3	333200	259800	5	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-30	340350	267300	4.4	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-307	335061	261251	42	0.7	ARCILLA / BASALTO	0.7	Cubierto	0.6	0.294	Baja
MTP-308	334954	261603	24.5	0.7	ARCILLA / BASALTO	0.7	Cubierto	0.6	0.294	Baja
MTP-31	341150	268450	7	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-313	340870	264250	8	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-314	340800	264350	9	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-32	341350	269100	3	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-323	341500	266000	12	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-33	342200	269200	8	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-34	342250	270200	3	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-35	343350	270750	5.2	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-36	343250	271350	10	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-37	336800	264350	5	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-38	335800	263600	7.3	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-39	336250	263900	5	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-40	335950	264550	4.6	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-41	337100	264950	4	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-42	342400	271500	4	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-43	341800	272300	6	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-44	344750	273200	20	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-45	340200	264200	10	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-53	340750	267970	8	0.8	N.I.		N.I.			
MTP-54	343200	271050	3	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable

MTP-56	341600	268850	4	0.9	SUELO VEGETAL	0.4	Cubierto	0.6	0.216	Baja
MTP-58	340825	267800	4	0.9	SUELO VEGETAL	0.4	Cubierto	0.6	0.216	Baja
MTP-59	340840	268070	9	0.8	ARENAS Y GRAVAS	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-63	343250	269900	6	0.8	ARCILLAS / ALUVIÓN	0.8	Cubierto	0.6	0.384	Media
MTP-66	333860	259745	3	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-67	333850	259870	3	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-68	333950	259890	4	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-69	333960	259755	4	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-71	336750	264550	5	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-77	340005	266005	5	0.9	COLUVIO / ALUVIÓN	0.7	Cubierto	0.6	0.378	Media
MTP-78	341800	272500	7	0.8	ARENA ARCILLOSA	0.7	NO	1	0.56	Alta
MTP-8	338900	265300	7	0.8	N.I.		N			
MTP-85	339800	265400	6.5	0.8	COLUVIO	0.7	NO	1	0.56	Alta
MTP-86	340750	266900	8.5	0.8	ARCILLAS / LAVAS	0.7	Cubierto	0.6	0.336	Media
MTP-87	341600	273350	8	0.8	SUELO / BASALTO	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-88	341750	273600	6	0.8	BASALTO	0.8	NO	1	0.64	Alta
MTP-89	342350	271850	12	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-9	339200	265000	3	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-93	339980	268320	2	0.9	N.I.		N.I.			
MTP-95	343225	271525	13	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
MTP-96	343400	271000	4	0.9	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
MTP-97	341485	273450	5	0.9	ALUVIÓN	0.8	NO	1	0.72	Extrema
VI-1	335500	252300	2	0.9	ARENA	0.7	NO	1	0.63	Alta

VI-100	335400	246750	1.5	0.9	ARCILLA Y ARENA	0.7	NO	1	0.63	Alta
VI-103	336850	249925	4	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-104	336740	250000	4	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-105	336675	250225	4	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-106	336000	250250	4	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-107	336115	250475	4	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-110	336950	249870	6	0.8	ARENAS SUELO VEGETAL /	0.7	NO	1	0.56	Alta
VI-116	335525	252850	6	0.8	ARENISCA	0.7	Cubierto	0.6	0.336	Media
VI-119	336280	252800	9	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	1	0.32	Media
VI-120	335740	252100	9	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	1	0.32	Media
VI-121	336550	246800	3	0.9	N.I.		N.I.			
VI-122	340700	248600	8	0.8	ARCILLAS Y COMPLEJO DE NICOYA	0.7	SI	1	0.56	Alta
VI-123	336100	249550	2	0.9	N.I.		N.I.			
VI-124	336840	249600	2	0.9	N.I.		N.I.			
VI-125	337950	250900	7	0.8	N.I.		N.I.			
VI-126	336000	250700	2	0.9	N.I.		N.I.			
VI-127	336200	249600	2	0.9	N.I.		N.I.			
VI-13	338500	252500	3	0.9	N.I.		N.I.			
VI-130	336010	244640	4	0.9	ARCILLAS / SUELO	0.4	SI	1	0.36	Media
VI-131	335310	245800	6	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	1	0.32	Media
VI-133	338110	249225	3	0.9	N.I.		N.I.			
VI-14	336700	241800	4	0.9	N.I.		N.I.			
VI-144	335600	245750	5	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-150	337325	243050	6	0.8	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
VI-151	337250	242900	5	0.9	ARCILLAS	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable

VI-152	337610	242506	3	0.9	ARCILLAS Y BASALTOS	0.4	Cubierto	0.6	0.216	Baja
VI-154	335561	246160	6	0.8	ARCILLAS Y BASALTOS	0.7	Cubierto	0.6	0.336	Media
VI-155	335950	245230	5	0.9	SUELO ARCILLOSO	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-156	337551	240872	9	0.8	N.I.		N.I.			
VI-157	337043	241094	6	0.8	N.I.		N.I.			
VI-160	335169	245166	8	0.8	COLUVIO	0.7	Semi conf	0.4	0.224	Baja
VI-163	335450	246081	6	0.8	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.064	Despreciable
VI-167	335450	253210	3	0.9	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-168	335690	253220	5	0.9	N.I.		N.I.			
VI-172	343000	254150	10	0.8	PEDERNAL	0.8	NO	1	0.64	Alta
VI-173	337900	242870	16	0.8	ARCILLA Y BASALTOS	0.7	Cubierto	0.4	0.224	Baja
VI-176	336309	245415	3	0.9	COLUVIO	0.7	NO	1	0.63	Alta
VI-19	337750	249200	3	0.9	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-22	342500	249900	5	0.9	N.I.		N.I.			
VI-23	342700	250100	8	0.8	N.I.		N.I.			
VI-26	342250	251050	5	0.9	N.I.		N.I.			
VI-27	340700	251550	7.5	0.8	N.I.		N.I.			
VI-28	340400	251400	3	0.9	N.I.		N.I.			
VI-4	334800	248200	9	0.8	SUELO	0.4	Cubierto	0.6	0.192	Baja
VI-47	336300	242750	3	0.9	N.I.		N.I.			
VI-48	336650	242700	5	0.9	N.I.		N.I.			
VI-5	335600	250400	7	0.8	TOBA	0.7	Cubierto	0.6	0.336	Media
VI-58	335500	244500	7	0.8	COLUVIO / ALUVIAL	0.8	NO	1	0.64	Alta
VI-59	340200	251600	5	0.9	N.I.		N.I.			
VI-6	336500	245400	9	0.8	N.I.		N.I.			

VI-60	335500	246300	5	0.9	COMPLEJO DE NICOYA	0.8	NO	1	0.72	Extrema
VI-61	335100	253370	4	0.9	ARCILLA SUELO	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-66	333700	252500	9	0.8	VEGETAL	0.4	Cubierto	0.6	0.192	Baja
VI-7	338900	250900	6	0.8	TOBA	0.7	Cubierto	0.6	0.336	Media
VI-8	334800	253900	9	0.8	TOBA	0.7	Cubierto	0.6	0.336	Media
VI-82	335750	246150	5	0.9	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-83	335600	246370	11	0.8	LAVA	0.8	NO	1	0.64	Alta
VI-84	336500	242200	6	0.8	N.I.		N.I.			
VI-85	336250	242150	4	0.9	N.I.		N			
VI-87	335720	246720	16	0.8	ARCILLA Y BASALTOS	0.7	SI	0.2	0.112	Baja
VI-9	336300	247200	7	0.8	N.I.		N.I.			
VI-91	335960	242450	2.5	0.9	ARCILLA	0.4	SI	0.2	0.072	Despreciable
VI-95	338050	250700	2	0.9	ALUVIÓN	0.8	NO	1	0.72	Extrema

9. ZONIFICACIÓN ACUÍFERA

Se ha hecho una zonificación acuífera con base en una clasificación de la capacidad de infiltración (o permeabilidad) de los suelos y en la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y los resultados se expresan en mapas con las diferentes categorías. Se hizo también una definición de las áreas de protección bacteriológica a los pozos de abastecimiento público, pero éstas resultan de dimensiones pequeñas en relación con la escala de trabajo que no es posible mostrarlas en mapas.

En este capítulo se hará referencia primeramente a la zonificación acuífera y posteriormente a las áreas de protección de los pozos de abastecimiento público.

9.1 Mapas de zonificación acuífera

Para lograr estos mapas se construyeron como primer paso mapas de categorías de permeabilidad (categorías de infiltración) de los suelos. Para eso se definieron inicialmente tres categorías: baja (de 0 a 0.5 m/d), media (de 0.5 a 2 m/d) y alta (mayor a 2 m/d). Al tratar de separar estas categorías en los mapas respectivos se notó que la densidad de la información no era tan alta como para trazar linderos precisos, por lo que en aras de hacer la delimitación de una manera más práctica se optó por integrar la categoría media dentro de la alta. Los mapas según permeabilidad ocupan el Anexo 9.2.

Una vez hechos estos mapas de categorías de permeabilidad se superpusieron sobre los mapas de vulnerabilidad ya mencionados en el capítulo 8 y se construyeron los mapas de zonificación acuífera que se presentan en el Anexo 9.1. En estos mapas se delimitaron áreas con las cinco categorías que se mencionan en los siguientes párrafos.

Categoría 1

Áreas de vulnerabilidad alta y media y de alta permeabilidad superficial. Son zonas que no necesariamente contienen acuíferos de alta producción sino que se puede dar el caso de áreas montañosas en los que la recarga se espera alta pero que el agua se infiltra rápido y fluye relativamente rápido para llegar a alimentar a los acuíferos más bajos. Ejemplos de esta categoría se encuentran en las laderas de los cerros al Este de Playa Pan de Azúcar y al norte y noreste de Hernández. El uso de estos terrenos es preferiblemente de desarrollo forestal, evitando las construcciones y aquellos elementos que puedan producir flúidos contaminantes y la impermeabilización del terreno.

Categoría 2

Áreas de vulnerabilidad alta y media y de baja permeabilidad superficial. Aquí se incluyen muchos acuíferos formados en aluviones, coluvios y basaltos fracturados. La perspectiva para definir el tipo de desarrollo debe considerar la eventual contaminación más que la recarga. Es decir, no tiene tanto impacto la impermeabilización del terreno como la producción de efluentes que puedan llegar a los acuíferos.

Categoría 3

Áreas con baja vulnerabilidad y alta permeabilidad. Entre ellas se incluyen sectores montañosos que pueden ser considerados como áreas de recarga a los acuíferos de las llanuras, sin que necesariamente formen acuíferos de alta producción. Nuevamente, el interés debe centrarse en controlar la impermeabilización del terreno con el desarrollo más que en el aspecto de contaminación.

Categoría 4

Sectores de baja vulnerabilidad y de baja capacidad de infiltración. En principio las restricciones para el desarrollo son menores. Se hace la aclaración de que dentro de esta categoría se encuentra una gran proporción del área montañosa de la cuenca Costeras Sur, pero la densidad de información es baja, por lo que podría haber cambios en este sector si se intensificaran las labores de investigación con mayor detalle.

Categoría 5

Ocupan una proporción muy baja del área de estudio y se refiere a sectores con poca importancia acuífera. Son de poca extensión, están formados por rocas poco permeables y se encuentran limitados por el mar o muy cercanos a él. El desarrollo que se produzca sobre estas áreas no parece tener injerencia con el régimen de agua subterránea.

En el cuadro 9.1 se da un resumen de lo concerniente a cada categoría de zonificación hidrogeológica.

Cuadro 9.1 – Características de las categorías de zonificación hidrogeológica

Categoría	Observaciones
1	Alta vulnerabilidad y alta permeabilidad superficial. Preferiblemente desarrollo forestal, con limitada impermeabilización del terreno y limitado vertido de fluidos potencialmente contaminantes de todo tipo.
2	Alta vulnerabilidad y baja permeabilidad superficial. El efecto de la impermeabilización del terreno no es tan importante como el vertido de fluidos potencialmente contaminantes de todo tipo.
3	Baja vulnerabilidad y alta permeabilidad. Áreas de recarga donde el impacto de la impermeabilización del terreno es el factor más importante. Debe evitarse el vertido de fluidos potencialmente contaminantes persistentes.
4	Sectores de baja vulnerabilidad y baja capacidad de infiltración. En principio, el desarrollo no tendría gran impacto en la cantidad ni en la calidad del agua subterránea.
5	Áreas sin relevancia acuífera. Acuíferos poco productores, con poca área de recarga.

9.2 Áreas de protección bacteriológica a los pozos de abastecimiento público

Se hizo una definición de la forma y dimensiones del área de protección bacteriológica a cada uno de los pozos empleados para abastecimiento público tomando como referencia que el tiempo promedio de vida de las bacterias en el subsuelo es de 70 días (AyA, 1994). El análisis se basó en una determinación del ancho del área de captura del pozo, la distancia flujo arriba para que el tiempo de tránsito de los fluidos que se infiltran fuera 70 días y el cálculo de la distancia al punto de estancamiento aguas abajo del pozo. Estos tres elementos se muestran de manera esquemática en la figura 9.1 y la metodología de cálculo se describe a continuación.

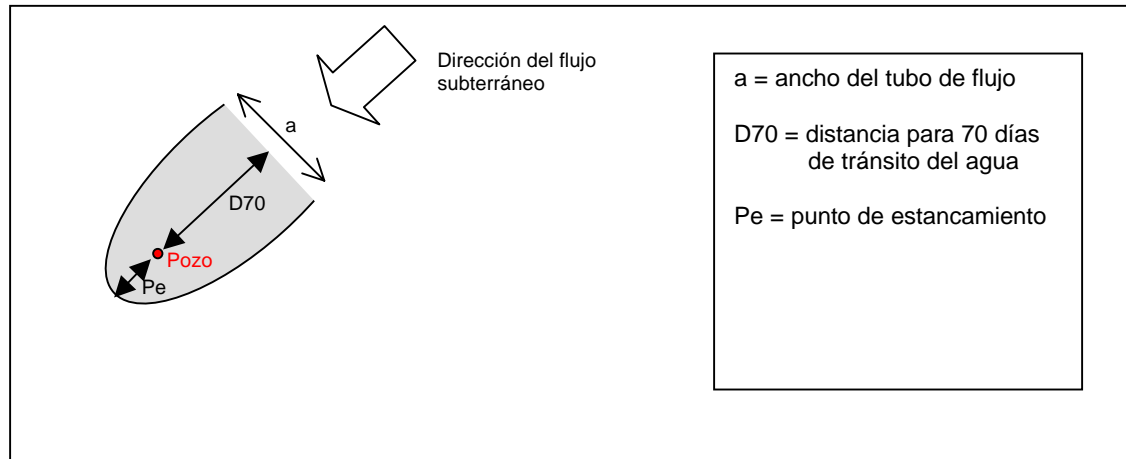


Figura 9.1 – Esquema para mostrar los elementos del cálculo del área de protección bacteriológica a los pozos.

9.2.1 Ancho del área de captura

Los detalles del cálculo de esta dimensión se da en el cuadro 9.2.a, y se basó en la ecuación:

$$a = Q/Ti \quad \text{en donde.}$$

a = ancho del área de captura (m)

Q = caudal del pozo ($m^3/día$)

T = transmisividad (m^2/d)

i = gradiente hidráulica (adimensional)

El caudal del pozo fue tomado de los registros de SENARA, en los pocos casos sin información éste se supuso con base en la producción de los pozos cercanos.

Para el cálculo de la transmisividad se consideraron los valores de permeabilidad indicada en el Cuadro 4.3 y se definieron los valores promedio representativos para cada material acuífero. Así, en los pozos que captan aluvión y lavas fracturadas la permeabilidad resultante es de 29.50 m/d; para el basalto fracturado es de 5.30 m/d y para el basalto denso es de 0.21 m/d.

Dependiendo de la litología del pozo en análisis, se multiplicó la permeabilidad correspondiente por el espesor acuífero, considerado como el espesor comprendido entre el nivel estático y el fondo del pozo y de esa manera se obtuvo la transmisividad.

El gradiente hidráulico fue tomado de las líneas equipotenciales mostradas en el mapa hidrogeológico.

Puede verse que los valores teóricos del ancho del área de captura van de los 5 m a los 4702 m. Este último valor no se considera real, pues más bien corresponde a situaciones teóricas basadas en supuestos ya que no existe información de ese pozo específico. En todo caso, y como se verá más adelante, este ancho no fue necesariamente el que definió el área de protección.

9.2.2 Distancia flujo arriba del pozo para un tiempo de 70 días

Aquí se hizo un análisis de los tiempos de tránsito en la zona no saturada y en la saturada. Los 70 días consideran el tránsito a través de ambas fases. La memoria de cálculo se presenta en el Cuadro 9.2.b . En primera instancia se trabajó en la no saturada, determinando una velocidad de viaje vertical con la ecuación de Darcy:

$$v = ki/n \quad \text{en donde:}$$

v = velocidad intergranular en sentido vertical (m/d)

k = permeabilidad del medio no saturado (m/d)

i = gradiente hidráulico (unitario para flujo vertical)

n = porosidad (adimensional)

La permeabilidad se definió con base en las pruebas de campo, en el cuadro 9.2.b se indica la prueba utilizada como referencia en cada caso. En los casos en que el material acuífero aflora, la permeabilidad asignada en el análisis es la mencionada en el análisis del ancho del área de captura.

La porosidad fue tomada de los análisis de laboratorio en los sitios indicados como referencia en el cuadro 9.2.b.

Una vez que se calculó la velocidad, se obtuvo el tiempo requerido para atravesar la zona no saturada. El espesor de dicha zona es el indicado en el cuadro 9.2.a.

Una vez hecho eso, se pasó a trabajar en la zona saturada, en donde el flujo es horizontal. La memoria de cálculo está también incluida en el cuadro 9.2.b. Aquí se calculó la velocidad del agua dentro del acuífero utilizando la ecuación recién mencionada, pero utilizando la permeabilidad del acuífero tomada del cuadro 9.2.a, la gradiente hidráulica del cuadro 9.2.a y la porosidad dependiendo del material acuífero. Para acuíferos fisurados se utilizó un valor de 0.1 según las normas del AyA (1994) y para los materiales granulares se empleó la porosidad determinada en el laboratorio.

Cuadro 9.2.a – Cálculo del ancho teórico del área de captación de los pozos de abastecimiento público

POZO	X	Y	Material	k (m/d)	b (m)	T (m²/d)	i	Q (l/s)	Q (m³/d)	ancho (m)
CJ-13	345500	226500	aluvión, lavas	29.50	27	797	0.003	10	864	362
ILG-745	342500	271500	<i>basalto fracturado</i>	5.30	25	133	0.028	5	432	116
ILG-753	342950	269880	<i>aluvión, lavas</i>	29.50	25	738	0.011	3	259	32
ILG-754	342990	269890	<i>aluvión, lavas</i>	29.50	25	738	0.011	5	432	53
MTP-18	339850	265800	basalto fracturado	5.30	21	111	0.01	6	518	466
MTP-236	342200	266350	basalto	0.21	78	16	0.1	1	86	53
MTP-237	342500	266550	basalto fracturado	5.30	62	329	0.1	6	518	16
MTP-238	341720	266550	basalto fracturado	5.30	96	509	0.13	4	346	5
MTP-242	341200	265555	basalto	5.30	52	276	0.1	6	518	19
MTP-243	341260	265710	basalto	5.30	65	345	0.1	6	518	15
MTP-53	340750	267970	<i>basalto fracturado</i>	5.30	28	148	0.02	8	691	233
MTP-63	343250	269900	aluvión, lavas	29.50	24	708	0.011	11	950	122
VI-122	340700	248600	basalto	0.21	20	4	0.05	1	86	411
VI-19	337750	249200	arenisca, basalto	5.30	27	143	0.007	6	518	517
VI-59	340200	251600	<i>basalto</i>	0.21	25	5	0.007	2	173	4702
VI-81	339850	251950	<i>basalto fracturado</i>	5.30	25	133	0.007	5	432	466
CV	340278	236313	basalto	5.30	25	133	0.02	5	432	163
BRAS	339731	265987	<i>aluvión, lavas</i>	5.30	25	133	0.01	5	432	326

Notas: k = permeabilidad b = espesor acuífero T = transmisividad
 i = gradiente hidráulico Q = caudal ancho = ancho del área de captura.

Con letra *cursiva* los datos inferidos por no contar con información

Cuadro 9.2.b – Cálculo de la distancia de protección aguas arriba de los pozos de abastecimiento público

POZO	ZONA NO SATURADA					ZONA SATURADA			Distancia (m)	OBSERVACIONES
	k (m/d)	Porosidad	vel (m/d)	Espesor (m)	t (días)	Porosidad	vel (m/d)	t (días)		
CJ-13	0.07	0.55	0.13	4	31	0.1	0.89	39	34	Ref: P68
ILG-745	5.3	0.1	53.00	4	0	0.1	1.48	70	104	Basalto fract. aflora
ILG-753	1.08	0.59	1.83	7	4	0.1	3.25	66	215	Coluvio sobre basalto. Ref: P5
ILG-754	0.03	0.59	0.05	7	138	0.1	3.25	0	0	Coluvio sobre basalto. Ref: P5
MTP-18	0.03	0.52	0.06	4	69	0.1	0.53	0	0	Arcillas aren. sobre basalt. Ref: P10
MTP-236	0.04	0.52	0.08	12	156	0.1	0.21	0	0	Arcillas, ref: P11
MTP-237	0.04	0.52	0.08	7	91	0.1	5.30	0	0	Arcillas, ref: P11
MTP-238	0.04	0.52	0.08	4	52	0.1	6.89	18	124	Arcillas, basalto ref: P11
MTP-242	0.04	0.52	0.08	20	260	0.1	5.30	0	0	Arcillas, basalto ref: P11
MTP-243	0.04	0.52	0.08	20	260	0.1	5.30	0	0	Arcillas, basalto ref: P11
MTP-53	0.1	0.69	0.14	8	55	0.69	0.15	15	2	Arenas y coluvio, Ref: P9
MTP-63	1.08	0.59	1.83	6	3	0.59	0.55	67	37	Ref: P5
VI-122	0.22	0.52	0.42	8	19	0.1	0.11	51	5	Ref. P37 y P40
VI-19	0.04	0.5	0.08	3	38	0.1	0.01	33	0	Ref: P40
VI-59	0.24	0.53	0.45	5	11	0.1	0.01	59	1	Ref. P32
VI-81	0.24	0.53	0.45	5	11	0.1	0.37	59	22	Ref. P32
CV	0.9	0.56	1.61	5	3	0.1	1.06	67	71	Ref: P57, fuera de área de estudio
BRAS	0.03	0.52	0.06	4	69	0.1	0.53	1	0	Ref: P10, puede ser el MTP-18

Cuadro 9.2.c – Forma del área de protección a cada pozo de abastecimiento público

POZO	Ancho del área de captura (m)	Distancia para 70 días (m)	Punto de estancamiento (m)	Forma y dimensiones del área de protección
CJ-13	362	34	58	Circular, 34 m de radio
ILG-745	116	104	19	25 m aguas abajo, 104 m aguas arriba, 116 m ancho
ILG-753	32	215	5	25 m aguas abajo, 215 m aguas arriba, 32 m ancho
ILG-754	53	0	8	Circular, 25 m de radio
MTP-18	466	0	74	Circular, 25 m de radio
MTP-236	53	0	8	Circular, 25 m de radio
MTP-237	16	0	3	Circular, 25 m de radio
MTP-238	5	124	1	25 m aguas abajo, 124 m aguas arriba, 25 m ancho
MTP-242	19	0	3	Circular, 25 m de radio
MTP-243	15	0	2	Circular, 25 m de radio
MTP-53	233	2	37	Circular, 25 m de radio
MTP-63	122	37	19	25 m aguas abajo, 37 m aguas arriba, 74 m ancho
VI-122	411	5	66	Circular, 25 m de radio
VI-19	517	0	82	Circular, 25 m de radio
VI-59	4702	1	749	Circular, 25 m de radio
VI-81	466	22	74	Circular, 25 m ancho
CV	163	71	26	26 m aguas abajo, 71 m aguas arriba, 142 m ancho
BRAS	326	0	52	Circular, 25 m de radio

Después de obtener la velocidad en sentido horizontal, se calculó la distancia que recorrería el agua subterránea en el tiempo faltante para los 70 días después de atravesar la zona no saturada. Esos resultados ocupan la penúltima columna del cuadro 9.2.b, y corresponden a la distancia aguas arriba del pozo a partir de la cual, los fluidos que se infiltran desde la superficie tardan 70 días o menos para llegar al pozo bajo condiciones de flujo natural.

En algunos casos la distancia es cero, y es porque el tiempo en atravesar la zona no saturada es superior a 70 días.

Es posible que bajo condiciones de bombeo, las velocidades del agua subterránea sean más altas y se requieran distancias de protección más grandes, pero estos cálculos requieren más información específica y detallada alrededor de cada pozo cuya obtención escapa a los objetivos del presente estudio.

9.2.3 Distancia al punto de estancamiento

El punto de estancamiento es el punto aguas abajo del pozo a partir del cual el agua subterránea no se “devuelve” hacia el pozo a causa del cono de abatimiento ocasionado por el bombeo sino que sigue su curso natural que traía aguas arriba del pozo.

La distancia a este punto se define con la ecuación (Todd, 1980):

$$X = Q / (2\pi T i) \quad \text{en donde las variables tienen el significado ya comentado dentro del acuífero.}$$

Estas distancias resultantes se muestran en la cuarta columna del cuadro 9.2.c.

9.3 Formas y dimensiones del área de protección bacteriológica de cada pozo

La relación entre el ancho del área de captura, la distancia para los 70 días y la distancia al punto de estancamiento dictó la forma y dimensiones del área de protección de cada pozo analizado, resultados que se exponen en la quinta columna del cuadro 9.2.c.

Se consideró prudente definir un área mínima de protección aún en los casos en que el tiempo de tránsito en la zona no saturada resultó superior a los 70 días. Esta distancia mínima se recomienda por dos razones principales: primero, el posible aumento de la velocidad del agua hacia el pozo en las inmediaciones de éste, y segundo, para contar con un espacio adecuado para las instalaciones propias de la operación del pozo como caseta, cachera y similares.

Las dimensiones de las áreas de protección bacteriológica resultantes no son lo suficientemente grandes como para ser dibujadas en un mapa a escala 1:50000, que es la escala de trabajo en el presente estudio, y por lo tanto no se incluyen en ningún mapa.

10. FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN

Las fuentes potenciales de contaminación identificadas en el área de estudio corresponden con centros de población que han crecido de manera natural y algunos desarrollos turísticos cuyo crecimiento se da de una forma más acelerada. Los desarrollos turísticos que cuentan con una planta de tratamiento no fueron considerados como fuentes potenciales de contaminación dada la premisa de que estos elementos han sido diseñados específicamente para darle una buena eliminación a las aguas servidas y que han pasado por un proceso de revisión técnica para su autorización.

Desde esta perspectiva, el elemento potencialmente contaminante más evidente son los tanques sépticos, cuyos efluentes provienen de aguas de desecho domésticas. No se encontraron otras actividades especiales como industrias, bodegas de productos peligrosos o gasolineras capaces de constituir una amenaza con productos más persistentes e impactantes.

Los tanques sépticos representan componentes bacteriológicos degradables y algunos elementos más persistentes como es el caso de los nitratos, los cuales podrían tener su relevancia en áreas de alta densidad de población.

Debe aclararse que con excepción de los pocos centros de población existentes, la densidad de viviendas es baja en el área de estudio, las fuentes potenciales de contaminación identificadas se refieren solamente a esos centros de población, no se incluyeron las viviendas aisladas por considerarse que no representan una fuente potencial de contaminación por la misma baja densidad.

En los mapas de vulnerabilidad del Anexo 8.1 se muestran los linderos de los centros de población considerados como fuentes potenciales de contaminación, delimitados con el criterio recién mencionado.

La relación entre el concepto de fuente potencial de contaminación y riesgo de contaminación será comentada en el capítulo 11.

11. MAPA DE RIESGO DE CONTAMINACIÓN

Las áreas con diferentes categorías de riesgo de contaminación se han obtenido sobreponiendo los conceptos de vulnerabilidad y las fuentes potenciales de contaminación comentadas en el capítulo anterior.

Los mapas de vulnerabilidad del Anexo 8.1 se han aprovechado para colocar sobre ellos la ubicación de las áreas que se consideran fuentes potenciales de contaminación, y en esos mismos mapas se clasifican estas áreas potenciales de acuerdo con el riesgo que representan, todo en concordancia con las condiciones de vulnerabilidad definidas en cada sitio.

Por ejemplo, una fuente potencial de contaminación ubicada sobre un área de baja vulnerabilidad implica un riesgo bajo de contaminación, pues si bien la fuente existe, el acuífero cuenta con una buena protección natural que hace que el riesgo sea bajo. Este es el caso de las fuentes de contaminación presentes en Potrero, para citar un ejemplo.

Si por el contrario, una fuente de contaminación potencial está sobre un área de alta vulnerabilidad, entonces el riesgo resultante es alto. En este caso existe la fuente de contaminación y existe la facilidad para que el acuífero se vea afectado. El sector de Brasilito clasifica dentro de esta categoría.

Otro posible escenario está representado por áreas de alta vulnerabilidad en las que no hay fuentes de contaminación, en este caso el riesgo es bajo aunque la vulnerabilidad sea alta.

En total se identifican tres sectores con riesgo alto de contaminación: Brasilito, Puerto Viejo, Marbella (parte suroeste), y dos con riesgo medio: Playa Blanca (Flamingo) y Hernández. Las demás se consideran de bajo riesgo.

Debido a que los mapas de riesgo de contaminación dependen de las actividades humanas, estos mapas no se pueden considerar invariables en el tiempo, sino que deben actualizarse conforme avanza el desarrollo en la región.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los materiales rocosos se clasifican en tres grupos generales: rocas del Complejo de Nicoya (basaltos, radiolaritas e intrusivos), depósitos coluviales y depósitos aluviales. De ellos, se han formado acuíferos en las capas superior fracturadas de los basaltos, en los coluvios y en los aluviones. Las secciones de basalto denso no presentan condiciones acuíferas favorables. Como es de esperarse, los menores valores de transmisividad encontrados corresponden a sitios en los que el pozo de prueba penetra un espesor de basalto denso.

En términos generales y con base en la información obtenida en el presente estudio, el espesor de los horizontes permeables, ya sea en roca fracturada o en depósitos sueltos, se encuentran a no más de 10 m de profundidad, lo que significa que los acuíferos son de poco espesor, ya que los niveles de agua subterráneas se encuentran bastante someros en la mayoría de los casos. Las fluctuaciones estacionales del nivel estático son de hasta 5 ó 6 m.

No hay una relación clara entre los parámetros físicos de los suelos y la formación o grupo geomorfológico sobre el que se encuentran. Posiblemente esto se debe a que los suelos muestran variaciones más frecuentes que los mostrados por la litología regional.

Se identifican algunos sectores cerca de la costa en los que ha habido o hay efectos de la intrusión salina. Las evidencias se basan en observaciones directas, referencias de personas en esos sitios, registros históricos de pozos o en la interpretación de los sondeos geofísicos.

La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación desde la superficie decrece de norte a sur. Así, en el sector de Costeras Norte hay predominancia de áreas con vulnerabilidad alta y media, mientras que las Costeras Sur la mayoría corresponde a sectores de baja vulnerabilidad.

Las áreas de protección a los pozos tienen tamaños diversos, desde círculos de 15 m de radio hasta franjas de 230 m x 23 m o de 123 m x 208 m. Las dimensiones y formas varían de acuerdo con las condiciones de profundidad al nivel del agua, tipo de cobertura, permeabilidades de la zona no saturada, permeabilidad del acuífero, caudal del pozo y gradiente hidráulica.

Las fuentes potenciales de contaminación son los centros de población o desarrollos turísticos. Por esta razón, los contaminantes provienen de aguas domésticas, lo que indica que el aspecto bacteriológico es el primordial, seguido por algunos compuestos químicos como los nitratos, los cuales son importantes en zonas de alta densidad de población. Muchas de los centros de población están ubicados en zonas de baja vulnerabilidad, por lo que no necesariamente representan un riesgo o amenaza.

Con base en los resultados obtenidos se hacen las siguientes recomendaciones.

Llevar a cabo campañas de monitoreo periódico de niveles de agua en pozos. La periodicidad puede ser mensual y las visitas podrían aprovecharse para medir la conductividad eléctrica del agua a fin de detectar variaciones que puedan atribuirse al efecto de intrusión salina. Este tipo de medición es más relevante en los meses de la época seca y sobre todo en los pozos cercanos a la costa. Es recomendable definir previamente una red de monitoreo de acuerdo con las posibilidades y los recursos con que se cuenta, los pozos no registrados en el SENARA e identificados en el presente estudio deberían ser tomados en consideración como posibles fuentes de información.

Es recomendable llevar a cabo campañas de pruebas de infiltración y de otros parámetros de los suelos en aquellos sitios en los que la densidad de información es baja.

Los mapas de vulnerabilidad a la contaminación han sido hechos con datos que en algunos sitios no están disponibles con la densidad que se hubiera deseado. Por esta razón es recomendable realizar cálculos de vulnerabilidad en sectores en los que actualmente hay poca información obteniendo primeramente mayores datos específicos.

Un caso especial de zonas de vulnerabilidad la constituye el sector de Potrero. En esta área, aunque los datos disponibles produjeron como resultado una categoría de baja vulnerabilidad a la contaminación, estos resultados podrían variar al contar con información más detallada, sobre todo considerando que la cubierta superficial es de poco espesor y podría ser eliminada o adelgazada ante movimientos de terreno aún poco significativos y que el nivel estático está a poca profundidad. Por esa razón ese sector se ha señalado con una simbología especial en los mapas de vulnerabilidad y de zonificación acuífera, catalogándose como un área en la que es necesario investigación adicional para definir sus características de vulnerabilidad y determinar el tipo de uso del terreno recomendado.

Las áreas de protección a los pozos que se definieron se basan en algunos casos en datos extrapolados y generalizados. Aunque se consideran una buena aproximación, es adecuado recalcularlas de acuerdo con información específica a recolectarse específicamente para los pozos que no cuentan con mucha información. Los datos a obtenerse se refieren a los parámetros hidráulicos del acuífero mediante pruebas de bombeo y definición detallada de la geología.

El muestreo periódico de aguas de los pozos ubicados en las áreas con mayor riesgo de contaminación es un instrumento de control y de seguimiento de la calidad del agua en estos pozos. Se recomienda este muestreo analizando el aspecto bacteriológico y físico químico, haciendo énfasis en componentes que pueden indicar el efecto de los tanques sépticos como los nitratos y el amonio.

Debido a que se han encontrado indicios de intrusión salina en los acuíferos aún a 500 m de distancia de la costa, es recomendable continuar condicionando la aprobación de construcción de pozos a una evaluación individual de este riesgo para aquellos sitios de pozos propuestos que se encuentren a menos de 1 km del mar o de algún manglar.

Finalmente, los límites entre las diferentes zonas dentro del área de estudio no deben ser tomados como rasgos rígidos y tajantes, sino como indicadores de la existencia de diversas categorías de terreno. Estos límites, más que líneas, deben verse como bandas o zonas de transición entre zonas y debe considerarse que están sujetos a un mejoramiento conforme avance la obtención de datos nuevos y se tenga más conocimiento de las condiciones hidrogeológicas.

El estudio realizado ha cubierto un área bastante extensa de cerca de 470 km² y al manejar un área de esas dimensiones a la escala de trabajo utilizada no se puede ahondar en ciertos detalles de sitios específicos. Por esta razón debe tenerse presente que este trabajo tiene un carácter de visión general y no pretende sustituir al trabajo detallado que pueda realizarse en determinado punto específico ante determinadas circunstancias.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el aporte de las siguientes personas:

- Hidrogeól. Clara Agudelo Arango, contraparte del SENARA en este trabajo, quien supervisó el avance de todas las actividades y brindó valiosas sugerencias durante el desarrollo del estudio.
- Geógrafa Ileana Méndez por su trabajo en la cartografía y elaboración de mapas y por sus sugerencias en este tema.
- Señor Mauricio Zúñiga por su trabajo de recopilación y selección de la información en los archivos del SENARA
- Géol. Dirroy Siu por su aporte en la realización de pruebas de campo y muestreos de suelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias Olman y Denyer Percy, 1992. "Mapa geológico de la hoja Carrillo Norte, Guanacaste, Costa Rica". Revista Geológica de América Central No. 16.
- AyA, 1994. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. "Normas para el cálculo de los tiempos de tránsito entre los drenajes de los tanques sépticos y las fuentes de agua subterránea". División de Estudios y Proyectos. San José.

- Dengo Gabriel, 1962. “Estudio Geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica”. IGN. San José. En Alvarado Ma. Elena, “Complejo de Nicoya”. Manual de Geología de Costa Rica. Sprechmann P (ed). Editorial Universidad de Costa Rica. 1984. Montes de Oca.
- Foster S, Hirata R, Gomes D, D’Elia M, París M. 2002. “Protección de la calidad del Agua Subterránea”. Banco Mundial. Washington, EUA.
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. 1989. “Fuentes alternas de agua para el abastecimiento de Playa Flamingo, Guanacaste”. División de Estudios y Proyectos.
- Schosinsky, Gunter y Losilla, Marcelino. 2000. “Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual”. Revista Geológica de América Central. No.23. Editorial de la Universidad de Costa Rica. Montes de Oca.
- Todd, DK. 1980. Ground Water Hydrology. John Wiley and Sons, Inc.

Anexo 2.1

Mapas geológicos

Ver el sobre correspondiente en el tomo “Mapas de los Anexos”

Anexo 3.1

Mapas geomorfológicos

Ver el sobre correspondiente en el tomo “Mapas de los Anexos”

Anexo 3.2

Mapas de pendientes

(Ver el sobre correspondiente en el tomo “Mapas de los Anexos”)

Anexo 4.1

Resumen de la información de los pozos
Fuente: archivos SENARA

Anexo 4.2

Gráficos de las pruebas de bombeo analizadas
Datos obtenidos de los archivos de SENARA,
análisis hechos en el presente trabajo.

Anexo 4.3

Mapas hidrogeológicos

Ver el sobre correspondiente en el tomo “Mapas de los Anexos”

Anexo 5.1

Mapas de ubicación de los sitios de las pruebas de infiltración y de muestreo de suelos para su análisis de laboratorio y de los sondeos eléctricos verticales (SEVs).

Ver el sobre correspondiente en el tomo “Mapas de los Anexos”

Anexo 5.2

Datos de campo y gráficos de las pruebas de permeabilidad

Anexo 5.3

Resumen de la determinación de los parámetros de los suelos (porosidad y densidad) a cargo del laboratorio Geotecnia y Pavimentos S.A.

Curvas granulométricas de las muestras que contienen más de un 50% de partículas mayores a 0.075 mm (malla 200)

Reportes de los análisis de capacidad de campo y punto de marchitez a cargo del laboratorio CIA-UCR

	
PROYECTO:	Acu
LOCALIZACION:	Sar
TECNICO:	And
MUESTRA REMITIDA:	Ge
ENSAYO	HUMEDAD MUESTRA

Anexo 6.1

Informe de la campaña de resistividad eléctrica
Preparado por Ingeofica Dos Mil. S.A.

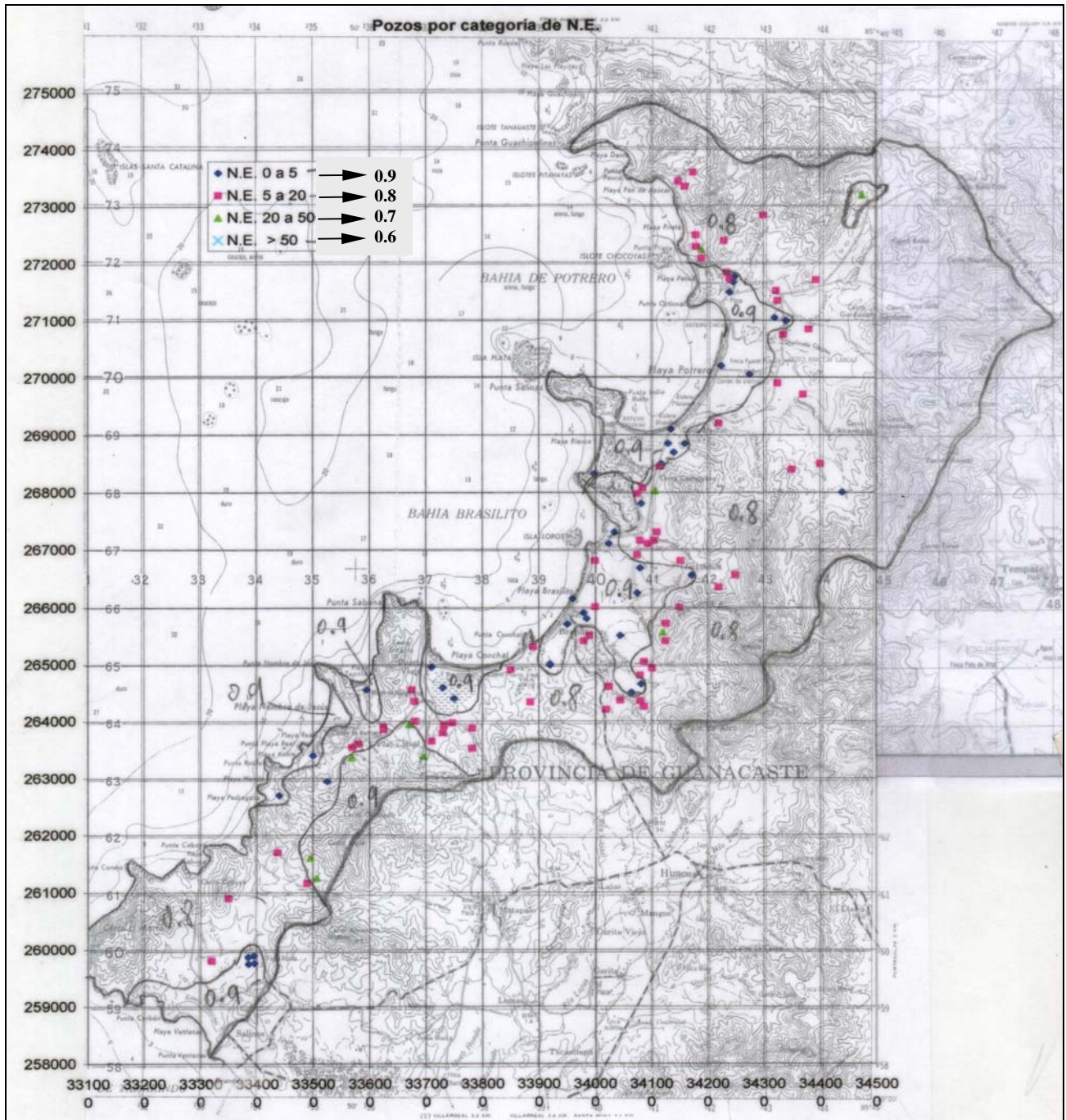
Anexo 8.1

Mapas de vulnerabilidad a la contaminación

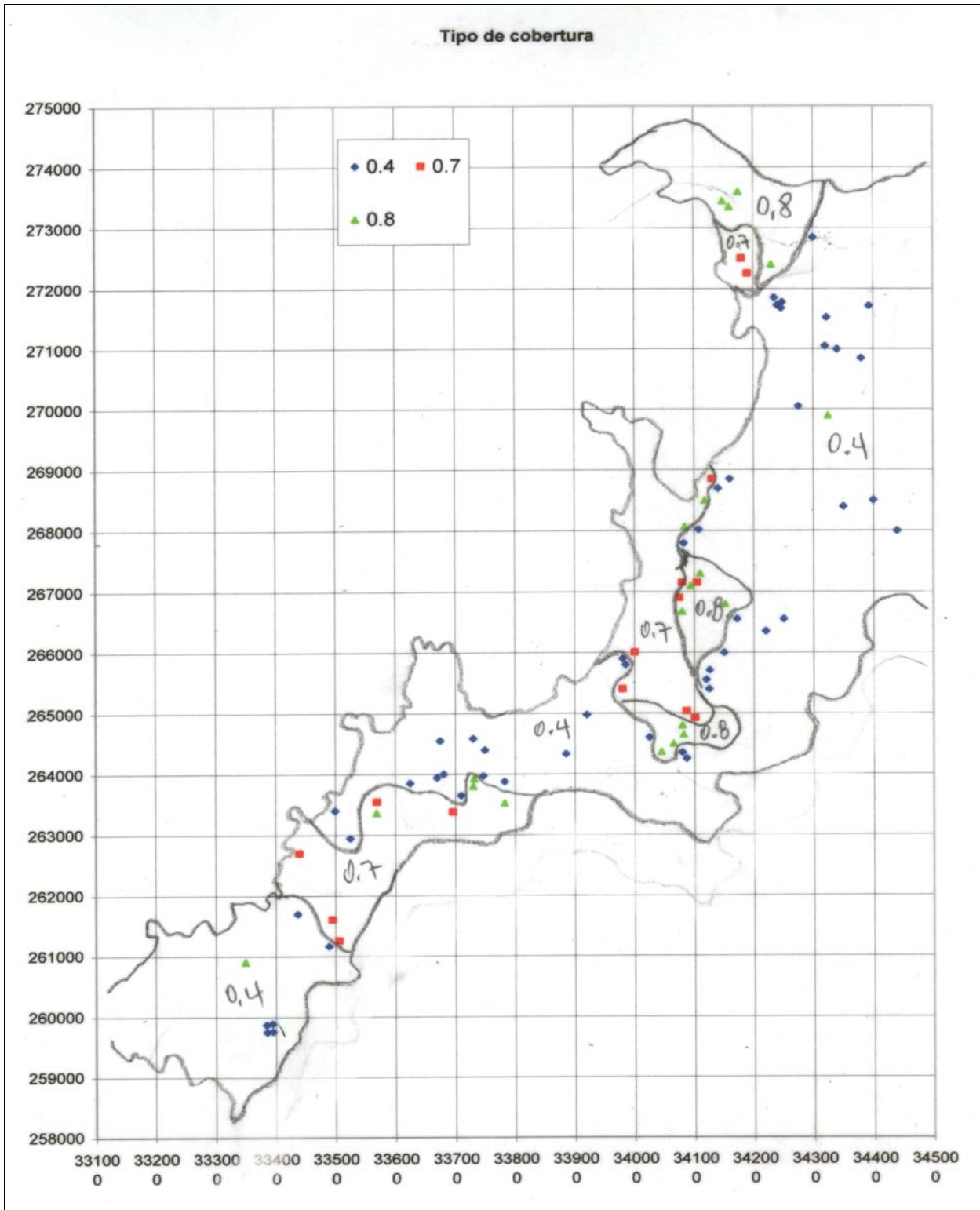
Ver el sobre correspondiente en el tomo “Mapas de los Anexos”

Anexo 8.2

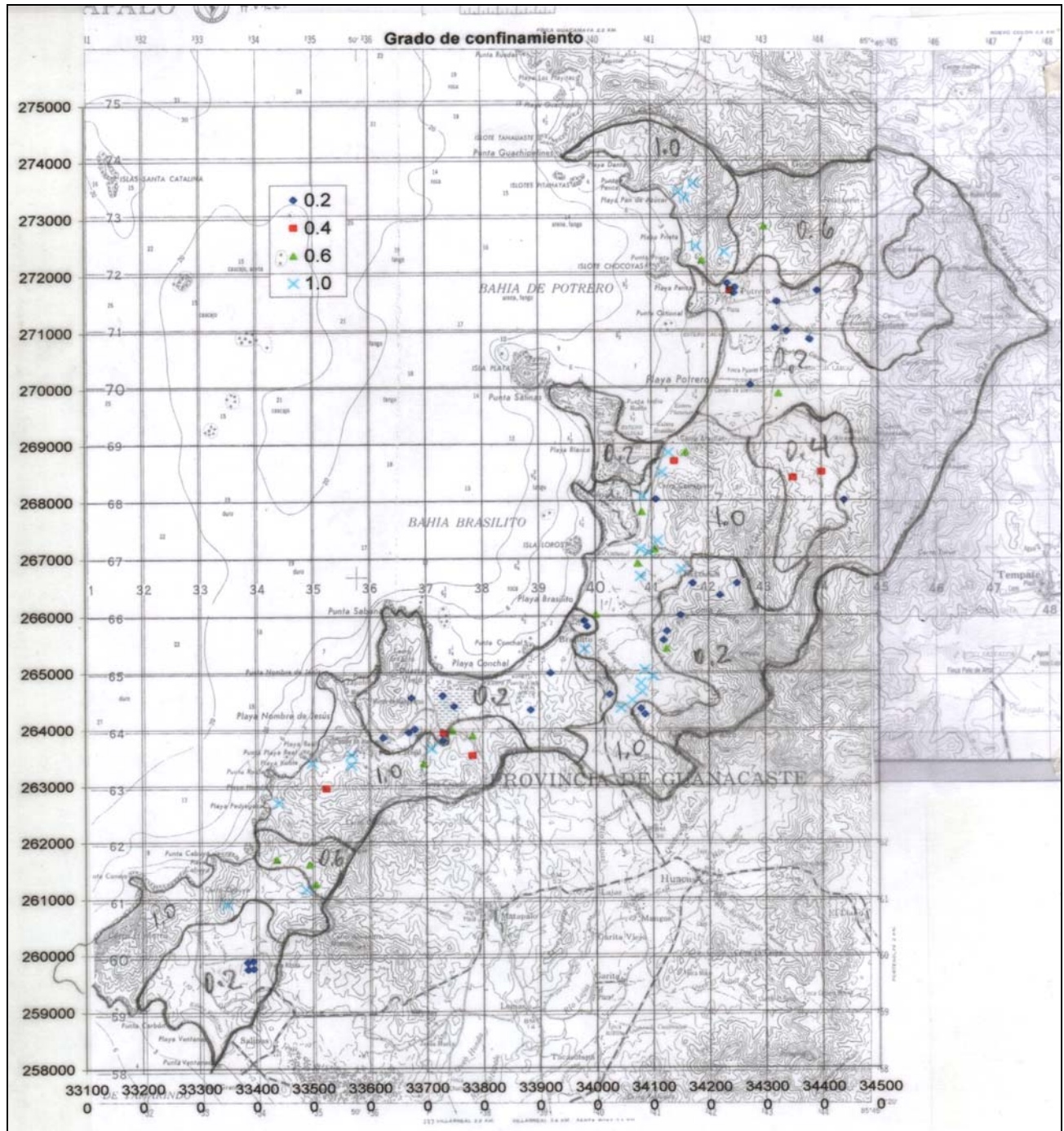
Mapas de los factores del método G.O.D.



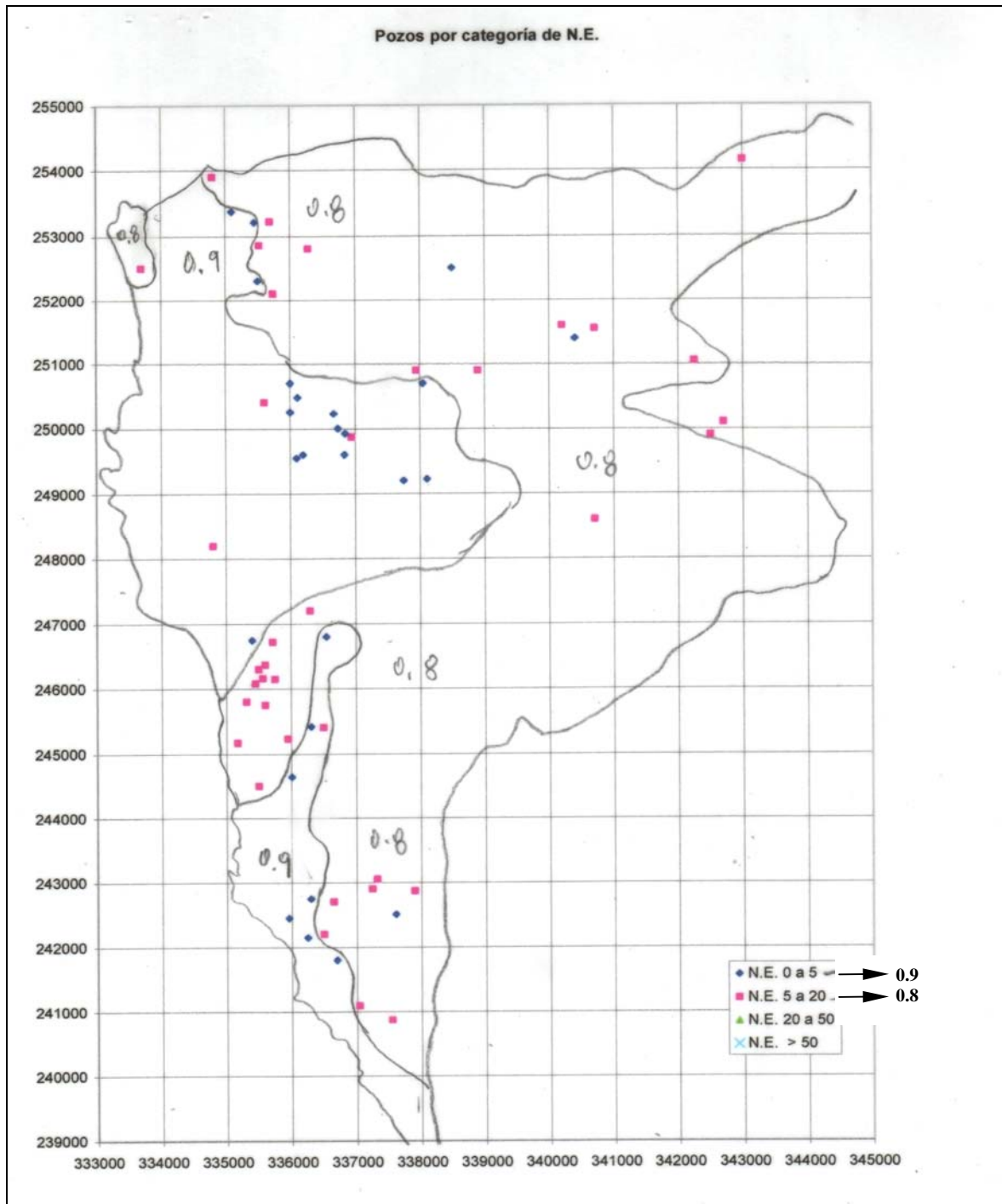
Mapa del factor profundidad al nivel estático. Costera Norte.



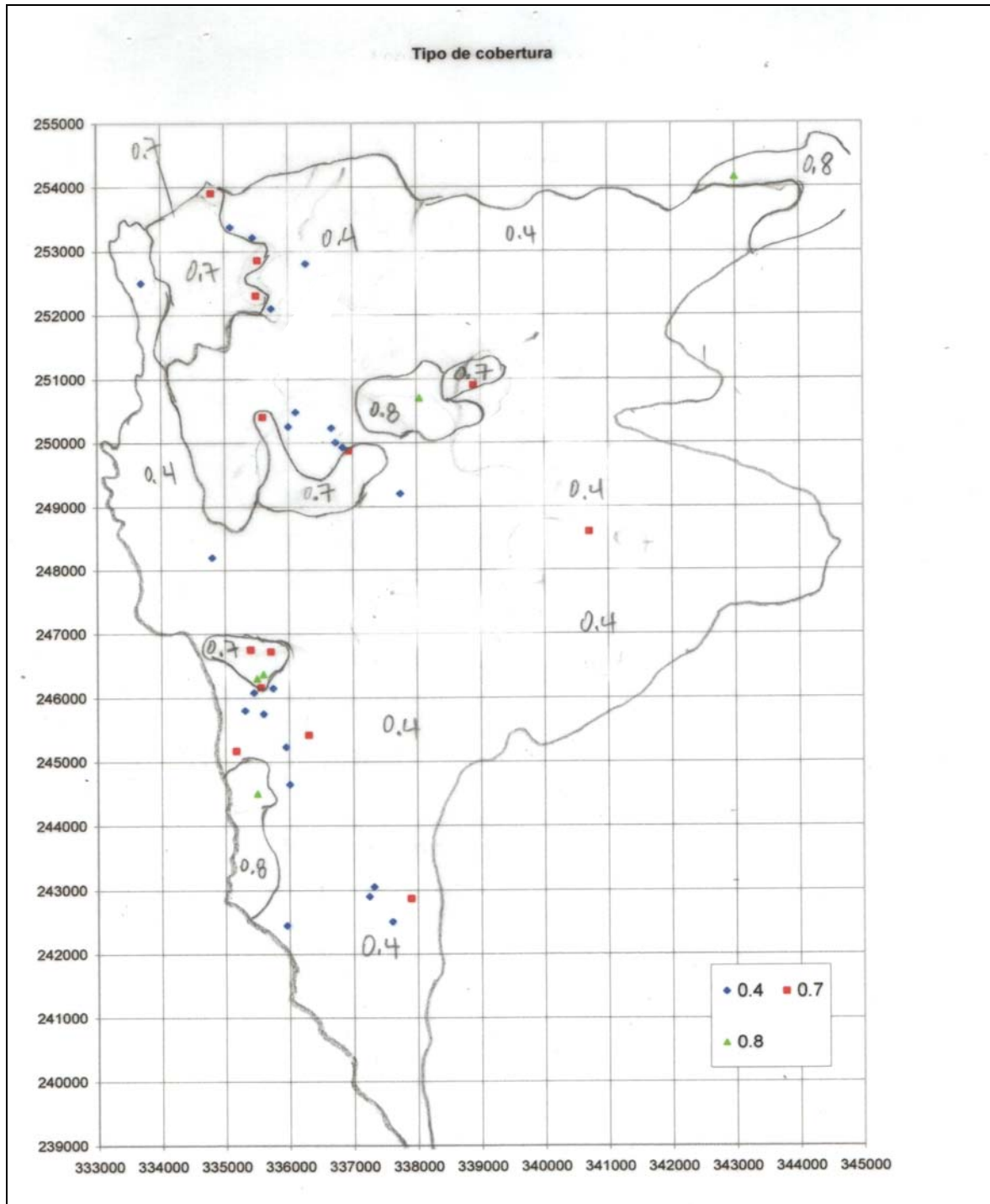
Mapa del factor tipo de cobertura. Costera Norte.



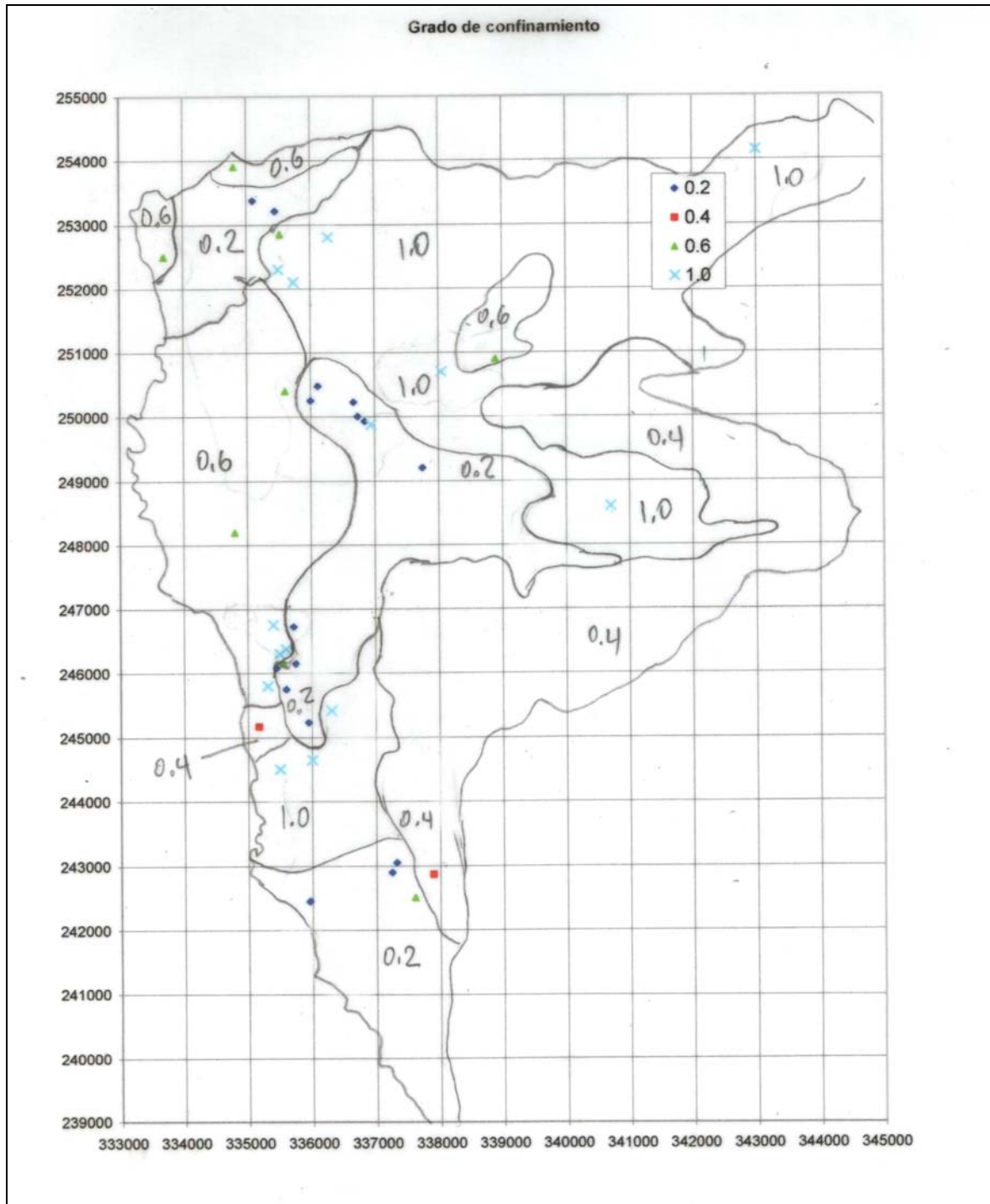
Mapa del grado de confinamiento. Costera Norte.



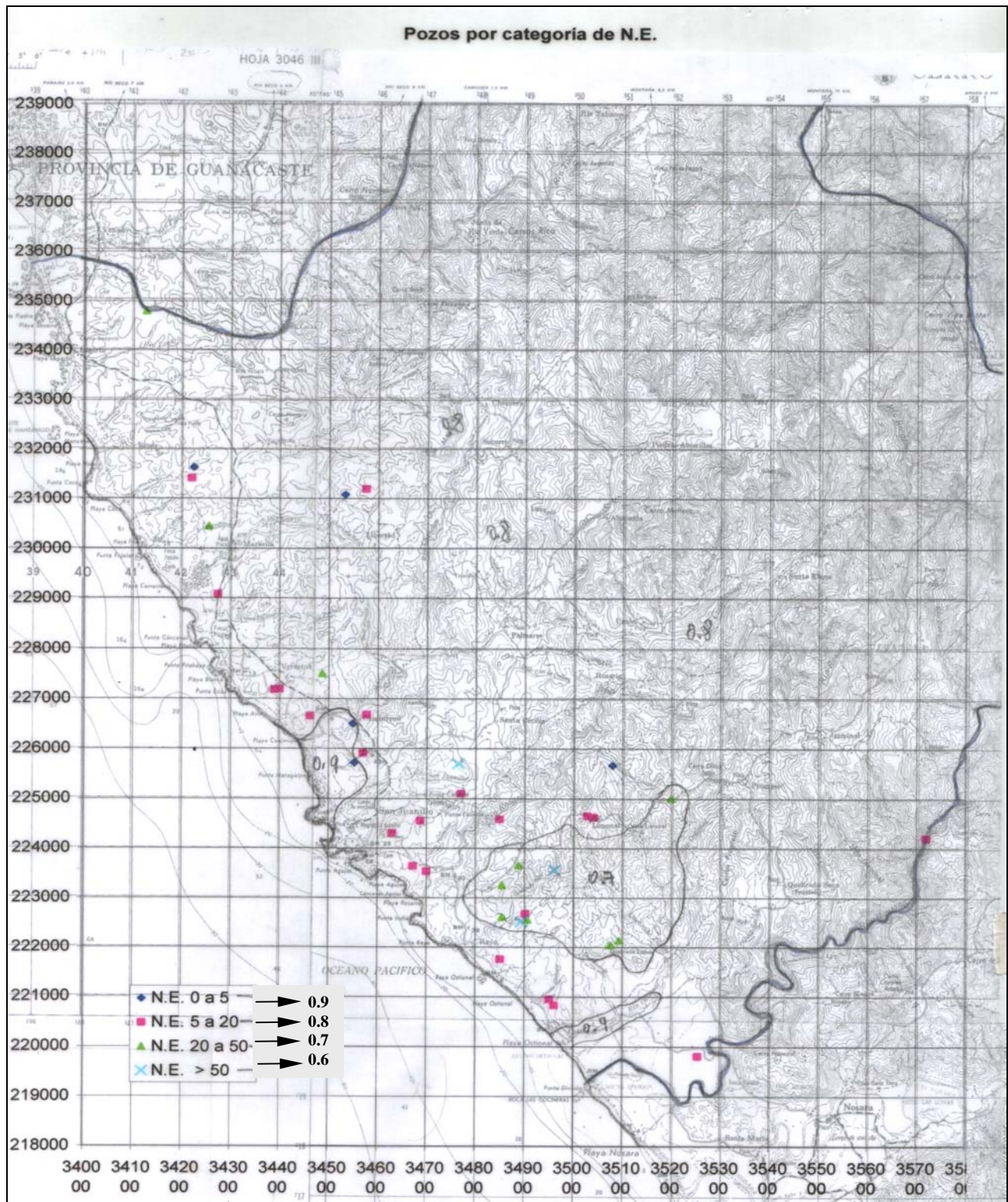
Mapa de categorías por prof. al N.E.. Pinilla - Junquillal



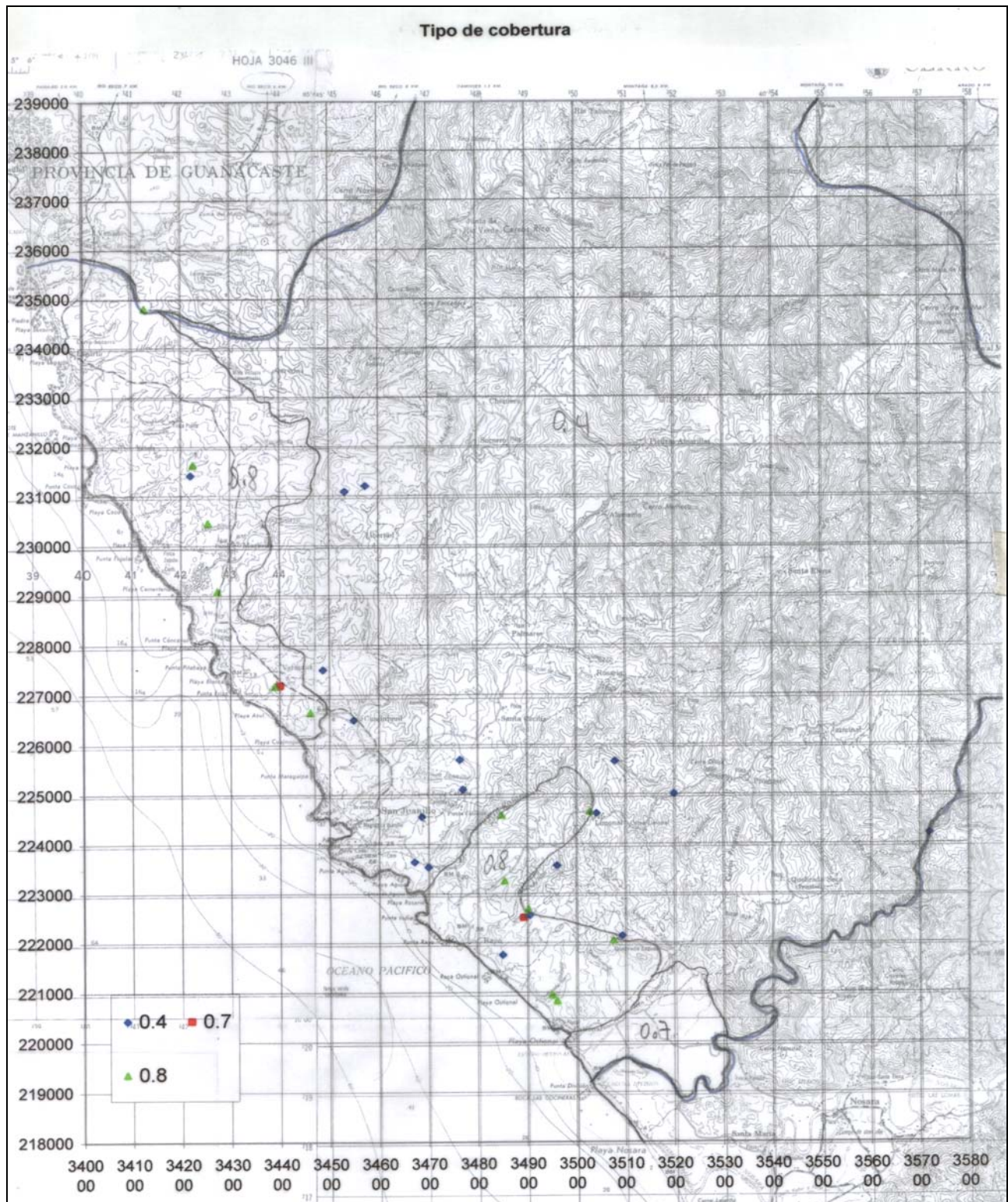
Mapa de categorías según tipo de cobertura. Pinilla-Junquillal



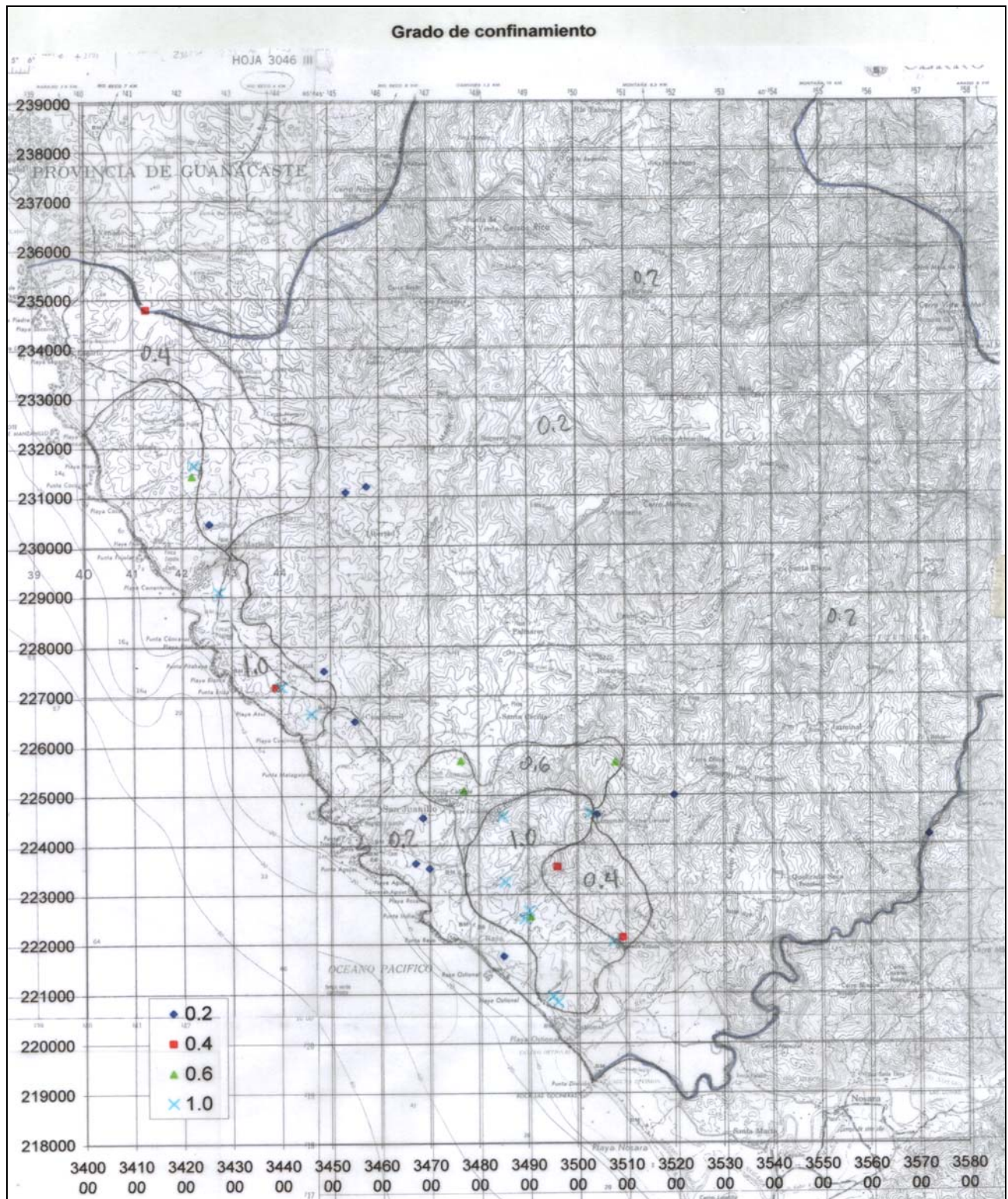
Mapa de categorías según grado de confinamiento. Pinilla-Junquillal



Mapa de categorías por profundidad al N.E. Costeras Sur.



Mapa de categorías según tipo de cobertura. Costeras Sur.



Mapa de categorías de grado de confinamiento. Costeras Sur.

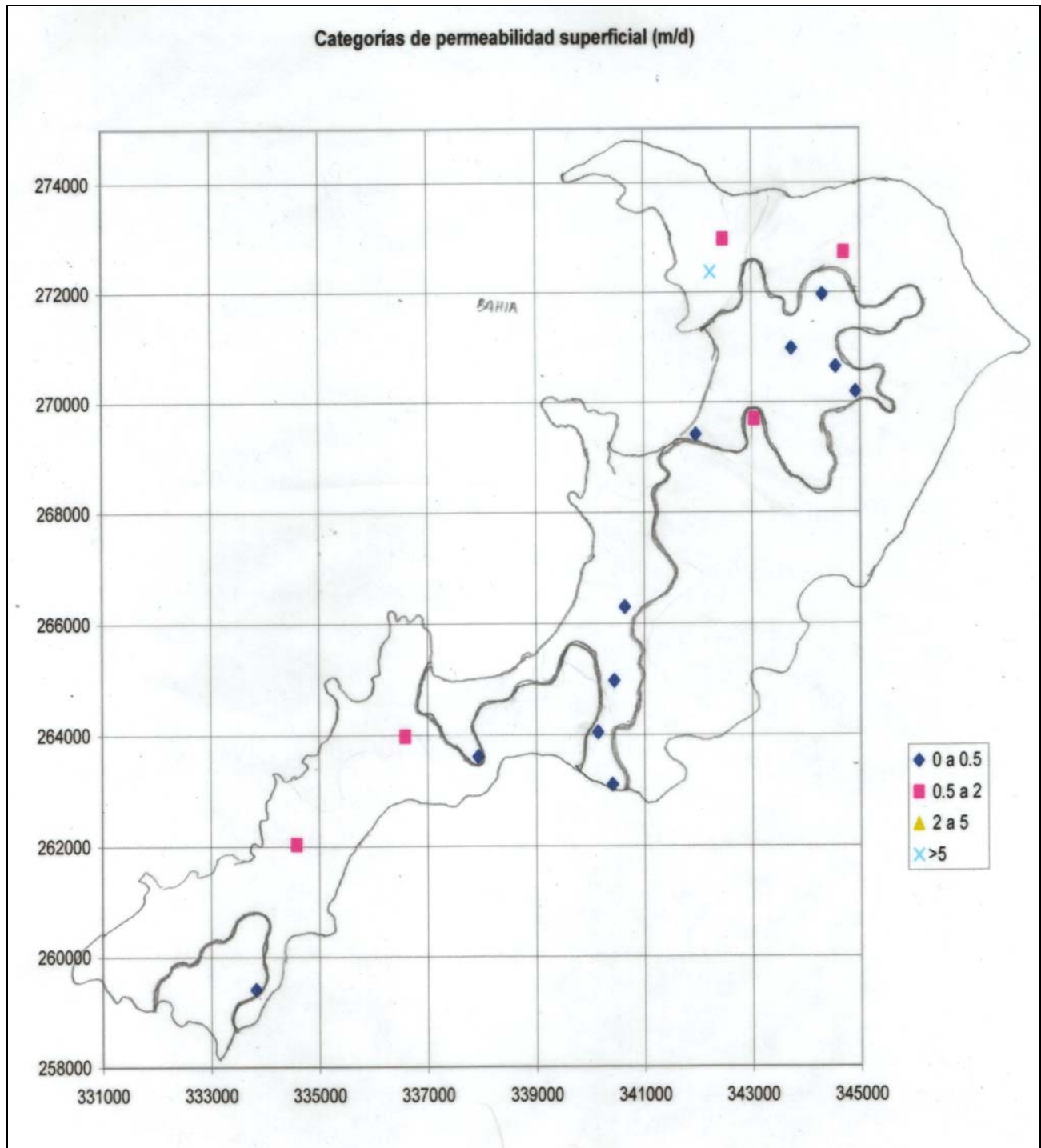
Anexo 9.1

Mapas de zonificación acuífera

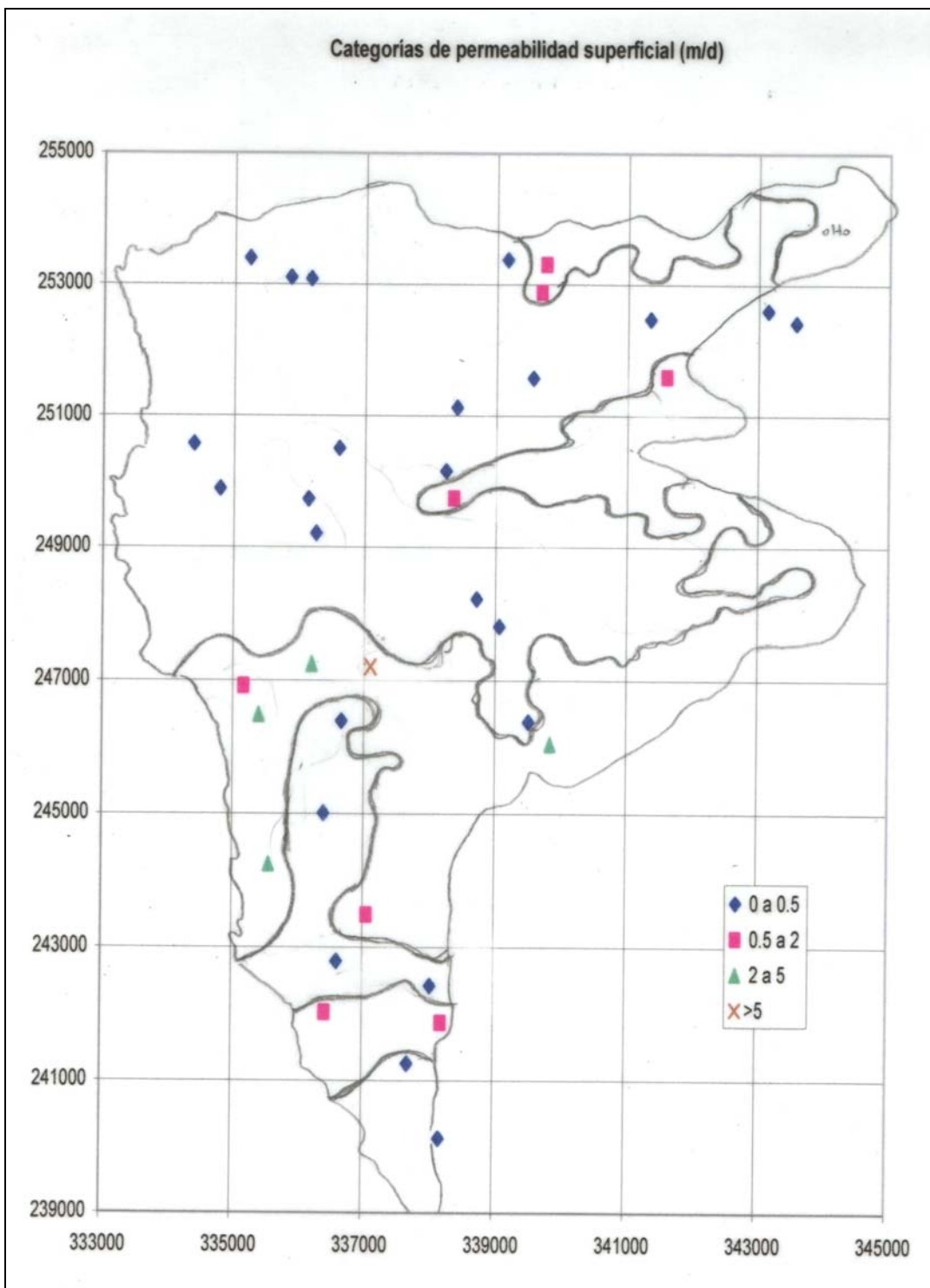
Ver el sobre correspondiente en el tomo “Mapas de los Anexos”

Anexo 9.2

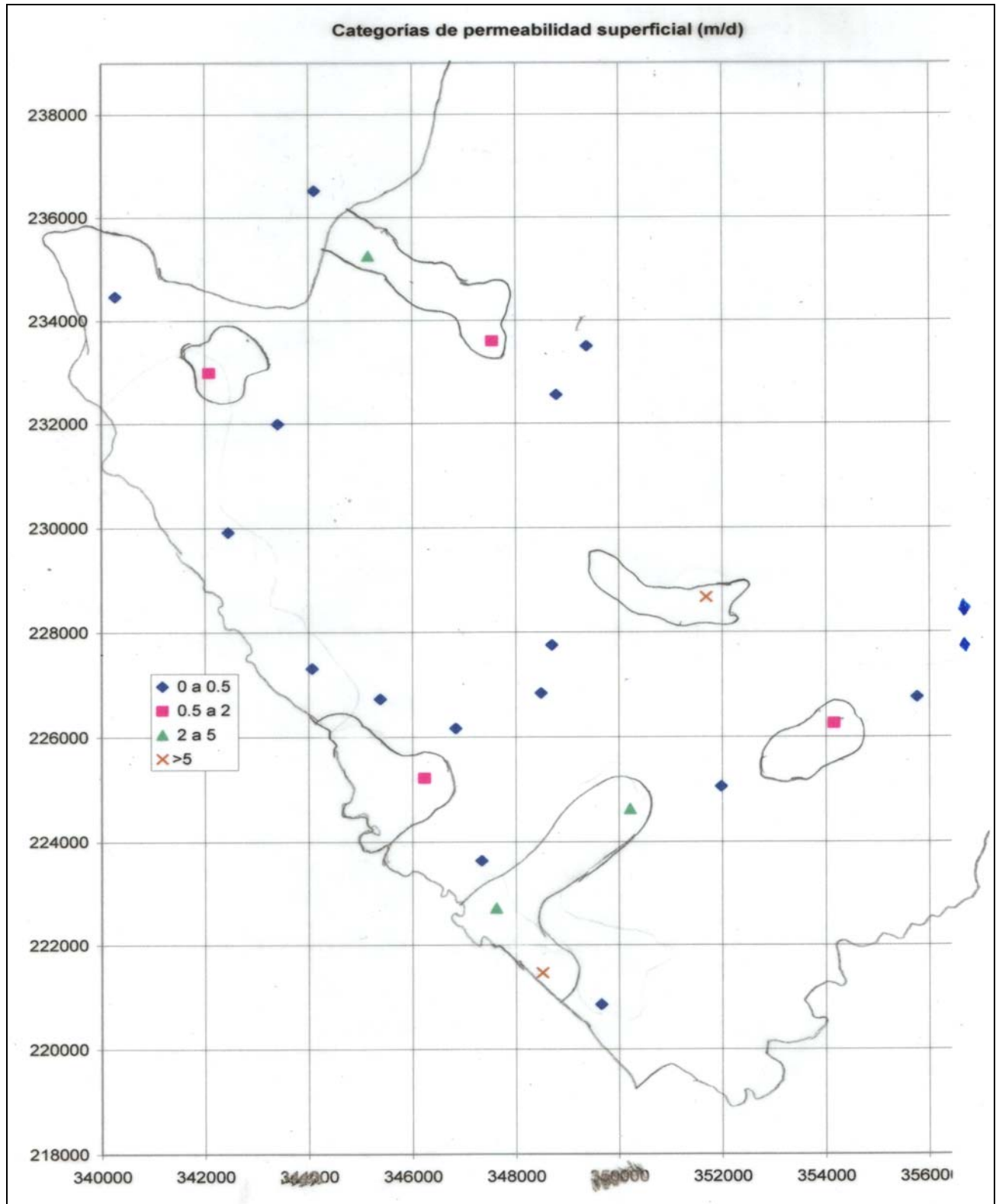
Mapas de zonificación según la permeabilidad superficial.



Mapa de categorías de permeabilidad superficial. Costera Norte.



Mapa de categorías de permeabilidad superficial. Pinilla-Junquilla



Mapa de categorías de permeabilidad superficial. Costeras Sur.



SENARA

**SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO
ÁREA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**DIAGNÓSTICO DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS
ALUVIALES Y COSTEROS BRASILITO, POTRERO, PINILLA,
AVELLANAS-JUNQUILLAL Y COSTEROS SUR, EN EL CANTÓN
DE SANTA CRUZ, GUANACASTE.**

**CONVENIO MUNICIPALIDAD DE
SANTA CRUZ – SERVICIO NACIONAL
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS,
RIEGO Y AVENAMIENTO**

**MAPAS DE LOS ANEXOS
SENARA, MARZO DEL 2008**



Elaborado por: Hidrogeól. Hugo V
Rodríguez Estrada, mediante la Licitación
Abreviada 2008LA-000005-OC

Contraparte en SENARA: Hidrogeól.
Clara Agudelo Arango, Dirección de
Investigación y Gestión Hídrica.