

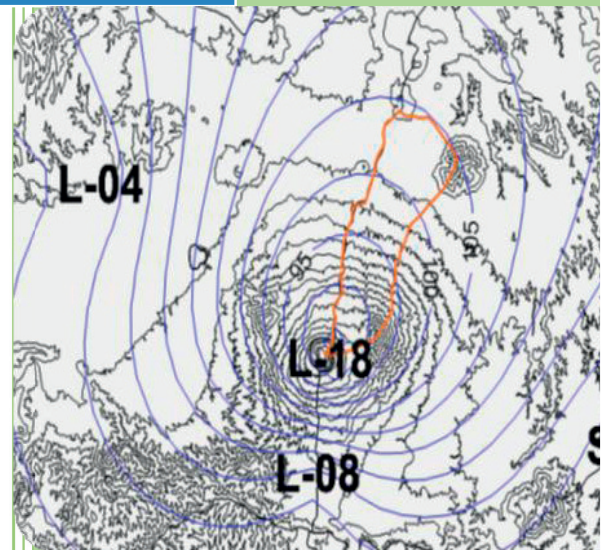
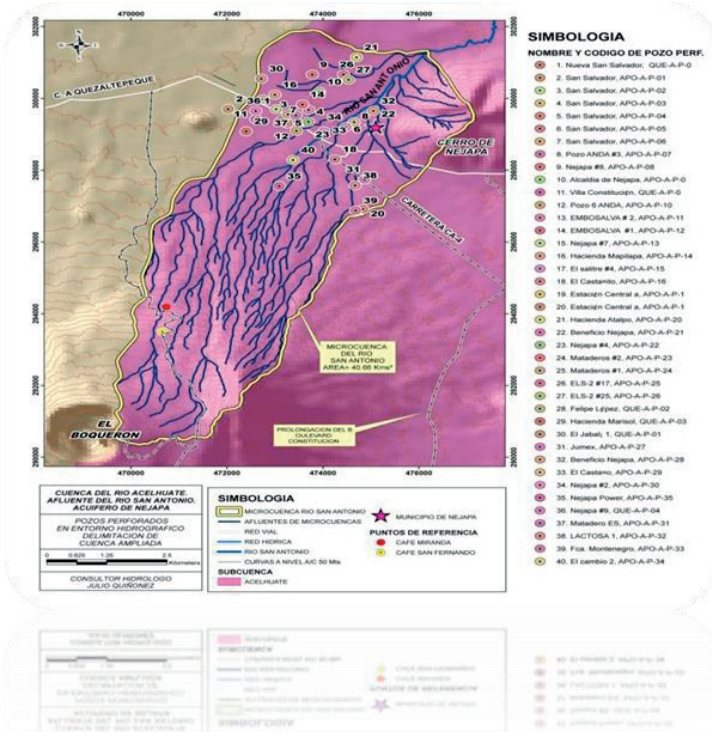
ESTUDIO

“Revisión y Análisis de los componentes Hidrológicos e Hidrogeológicos del Estudio Hidrogeológico, Hidrológico, Hidráulico y de Riesgo Zona Planta Nixapa, Industrias La Constancia ILC, Nejapa, departamento de San Salvador, Nejapa, departamento de San Salvador”



ESTUDIO

“Revisión y Análisis de los componentes Hidrológico e Hidrogeológico del ‘Estudio Hidrogeológico, Hidrológico, Hidráulico y de Riesgo Zona Planta Nixapa, Industrias La Constancia ILC, Nejapa, departamento de San Salvador, Nejapa, departamento de San Salvador’



**ENTIDAD PROMOTORA:
 FORO DEL AGUA
 PRESENTA:
 JULIO QUIÑONEZ B.
 FECHA: OCTUBRE DE 2013**



Con el apoyo solidario de:



“Revisión y Análisis de los componentes Hidrológicos e Hidrogeológicos del Estudio
Hidrogeológico, Hidrológico, Hidráulico y de Riesgo Zona Planta Nixapa”
Industrias La Constancia ILC, Nejapa, departamento de San Salvador

Impreso en Talleres Gráficos UCA
Marzo 2014

San Salvador, El Salvador, C.A.

INDICE

I.	INTRODUCCION	5
II.	CARACTERIZACION HIDROFISICA DE LA CUENCA DEL RIO SAN ANTONIO	7
II.1	Ubicación de la Cuenca de Estudio y Climatología.....	8
II.2	Fisiografía	9
II.3	Tipo de Suelos.....	11
II.3	Usos del Suelo.....	13
II.4	Geología.....	15
III.	FORMACIONES HIDROGEOLÓGICAS, MODELO Y ANÁLISIS DE LAS CARACTERISTICAS DEL ACUIFERO	19
III.1	Formaciones hidrogeológicas.....	19
III.1.1	Unidad hidrogeológica en acuífero porozo de productividad media o baja constituido por depósitos piroclásticos del Cuaternario.	19
III.1.2	Unidad hidrogeológica en acuífero fisurado o lavas fracturadas del cuaternario de alta productividad.	20
III.1.3	Unidad hidrogeológica de rocas con poca capacidad acuífera.	20
III.2	Modelo conceptual del acuífero de Nejapa.	21
a.	Modelo del acuífero de Nejapa	21
b.	Delimitación del acuífero de Nejapa	26
III.3	Delimitación equívoca del acuífero en el estudio hidrogeológico del EIA-ILC	26
IV.	BALANCE HIDRICO DE LA CUENCA DEL RIO SAN ANTONIO.....	31
IV.1	Método G. Shusinsky 2000 para el cálculo del Balance Hídrico.....	31
IV.2	Cálculo del Balance Hídrico en la cuenca del río San Antonio mediante el método Shusinsky 2000.	34
IV.3	Desarrollo del Balance Hídrico mediante aplicación de Coeficientes de Precipitación - Esguerramiento (PE) implementados en el Balance Hídrico Dinámico de El Salvador (SNET-2005).	57
IV.4	Valoración comparativa desde otros estudios desarrollados.	58
IV.4.1	Gil, L., "Evaluación Hidrogeológica y Vulnerabilidad Intrínseca del Sistema Acuífero del Municipio de Nejapa, San Salvador, El Salvador". Investigación de Tesis de post-grado- Universidad de Costa Rica 2007.	59

IV.4.2	Ponce de León y otros., “Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamientos de los recursos hidrogeológicos en el municipio de Nejapa”. Geólogos del Mundo, 2003.	59
IV.4.3	Junker, M. “Zonificación y mapa de la recarga acuífera”, Aplicación del Método RAS” FORGAES, 2007.	60
IV.4.4	SNET-MARN “Balance Hídrico Dinámico de El Salvador, 2005.	60
V.	EVALUACION DE LAS EXTRACCIONES Y DEMANDA HIDRICA EN LA ZONA.	61
VI.	DISPONIBILIDAD HIDRICA EN PROYECCION FUTURA DEL ACUIFERO DE NEJAPA.	64
VI.1	Análisis de la disminución de la línea de Saturación en proyección futura bajo condiciones de sobre explotación.	64
VI.2	Análisis de la disminución de la línea de Saturación en proyección futura bajo condiciones de sobre explotación y cambio climático.	68
VI.3	Análisis de la demanda y su disminución como proyección futura.	70
	Esquema de flujo (Q) en la ley de Darcy.	71
VI.4	Evaluación de la disminución de los caudales base del río San Antonio.	73
VII.	MEDIDAS DE IMPLEMENTACION Y COMPENSACIÓN PARA UN APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL ACUIFERO.	74
VIII.	CONCLUSIONES.	75
IX.	RECOMENDACIONES.	77

I. INTRODUCCION

El presente documento constituye el **borrador de informe final** de la consultoría **“Revisión y Análisis de los componentes Hidrológico e Hidrogeológico del Estudio Hidrogeológico, Hidrológico, Hidráulico y de Riesgo Zona Planta Nixapa, Industrias La Constancia (ILC), Nejapa, departamento de San Salvador”**, siendo dicho estudio, elaborado en el marco del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto “Modificación de Resolución MARN N° 065-2001. Ampliación de Operación para Envasado de Agua en Planta Nixapa”, presentado al MARN en el primer trimestre del año 2013 por la firma J.R. Duarte S.A de C.V.

El Estudio de Impacto Ambiental se ha realizado y presentado al MARN con el objetivo de llevar a cabo el traslado de las operaciones de producción de agua envasada hacia un terreno de 28,952.40m² ubicado contiguo a la planta NIXAPA, ambos propiedades de ILC, la cual se ubica en la Carretera que desde San Salvador conduce hacia Quezaltepeque, km 20 ½, Cantón Galera Quemada, Municipio de Nejapa; donde actualmente se lleva a cabo la producción de Bebidas Carbonatadas y no Carbonatadas. Actualmente la producción de agua envasada se lleva a cabo en las instalaciones de ILC ubicadas al final de la avenida Independencia, San Salvador.

Con el traslado de las operaciones y de acuerdo a la información proporcionada en el EIA, la ampliación de la operación en la Planta Nixapa requerirá de un consumo adicional de 79,122 m³/mes (949,464 m³/año) (30.1 l/s), al actualmente existente de un estimado promedio de (674,431 m³/año) equivalente a 21.4 l/s. Es decir en conjunto se estaría extrayendo un total aproximado de 51.5 l/s.

El objetivo general de la presente consultoría es llevar a cabo una revisión y análisis valorativo, fundamentalmente en lo concerniente al cálculo hidrológico e hidrogeológico, caracterización hidro-geofísica del territorio de estudio (cuenca del río San Antonio inmersa como vertiente del acuífero de Nejapa), aspectos territoriales en cuanto al uso y vocación del suelo, recarga hídrica del acuífero de Nejapa y demanda hídrica presente y futura, así como el análisis evaluativo de los puntos concluyentes del estudio hidrológico e hidrogeológico; cuyos resultados principales están integrados al EIA, siendo éste realizado por la misma firma proyectista.

Para ello, en un primer momento se desarrolla la caracterización hidrogeofísica de la zona de estudio, en cuanto a la fisiografía, usos del suelo, tipos de suelo, geología, formación y modelación conceptual hidrogeológica del acuífero de Nejapa; a partir del cual se verifica la delimitación equívoca del acuífero establecida en el EIA-ILC, y por consiguiente, la no inclusión de un parte importante de las extracciones en la demanda total de la zona de estudio. La demanda verificada e incluida en el estudio es de 9.67 Millones de Mt^3 (Mm^3) y la demanda verificada y no incluida es de 19.04 Mm^3 . Es decir, la demanda total verificada es de 28.71 Mm^3 . Adicional a ello, existe una demanda no reportada a ANDA, de la cual no se poseen datos verificados. Dado que en el estudio EIA-ILC se estima una demanda de 15.63 Mm^3 , puede establecerse esa demanda no reportada en el orden de los 5.96 Mm^3 .

Se calcula en un próximo apartado, el balance hídrico de la cuenca del río San Antonio, como vertiente hidrográfica del acuífero de Nejapa, mediante dos metodologías de análisis. La primera se basa en el método de Gunther Shusinsky- Losilla (2000), la cual fue aplicada en el Estudio Hidrogeológico; y una segunda, mediante coeficientes de Precipitación-Escorrimento (P-E) determinados para las diferentes regiones hidrográficas a nivel nacional, y utilizados para la ejecución del Balance Hídrico Dinámico de El Salvador, SNET 2005.

En un tercer momento, se desarrolla el análisis valorativo del balance hídrico efectuado en el estudio hidrogeológico del EIA-ILC, especialmente en lo concerniente a la determinación de la recarga hídrica y la disponibilidad hídrica del acuífero, las cuales se observan excesivamente sobrevaloradas como consecuencia, primordialmente, del alto índice de permeabilidad (K_{fc}) conferido en la zona de recarga (1400 mm/día), lo cual es propio de arenas y gravas, y no de suelos Andisoles con textura franca - limosa (150 mm/día - 300 mm/día), que se presentan en la zona de estudio, los cuales provienen de una formación geológica volcánica reciente y son característicos de las regiones cafetaleras en el país. En esta misma dirección, estudios antecedentes, reflejan de igual forma, una diferencia considerable en cuanto a la determinación de la recarga hídrica, en relación a los resultados obtenidos en el estudio Hidrogeológico del EIA-ILC, y por consiguiente, una mejor correspondencia a las condiciones del comportamiento hidrológico, tal como se destaca en el apartado del Balance Hídrico.

Esta aplicación de un alto índice de infiltración en el Estudio Hidrogeológico del EIA-ILC, genera en los cálculos del Balance Hídrico, una total ausencia de escurrimiento o escurrimiento "0" en todos los meses del año; lo cual contraviene la dinámica natural del ciclo hidrológico en la zona de estudio, en

la que se pueden apreciar los pequeños flujos permanentes en los diversos cauces naturales de las estribaciones medias del volcán de San Salvador, durante la época lluviosa, y más aún, posterior a eventos meteorológicos, haciéndose evidente las huellas de los flujos de crecidas y la presencia del arrastre sedimentario consecuente.

Posteriormente, se lleva a cabo un análisis de la demanda de agua en la zona de aprovechamiento, en base a la información e inventario disponible de pozos perforados y a partir del trazo correspondiente al acuífero de Nejapa ubicado en la zona baja de la cuenca del río San Antonio.

A partir del análisis, puede observarse una cantidad significativa de pozos que no han sido tomados en cuenta en el estudio Hidrogeológico del EIA-ILC, como parte de la extracción directa de agua subterránea del acuífero de Nejapa; lo cual deriva en una reducción considerable del volumen de agua subterránea, que dista mucho de los volúmenes realmente extraídos, tal como se ha explicado anteriormente.

Finalmente, se presenta un apartado de conclusiones y recomendaciones provenientes de los resultados obtenidos y análisis efectuados.

II. CARACTERIZACION HIDROFISICA DE LA CUENCA DEL RIO SAN ANTONIO

La caracterización hidrofísica en lo concerniente a la climatología, fisiografía y pendientes topográficas, tipos de suelo, usos del suelo y geología es de gran importancia ya que permite la determinación de los factores hidrográficos que inciden en el escurrimiento superficial y por consiguiente en el cálculo de la infiltración en la zonas de recarga hídrica y en la disponibilidad de agua subterránea.

En ese sentido se presenta en este apartado la descripción, caracterización y cuantificación de las áreas para la categorización de los usos del suelo, pendientes, tipo de suelo y geología de la cuenca hidrográfica del río San Antonio.

II.1 Ubicación de la Cuenca de Estudio y Climatología

a. Ubicación de la Cuenca

La microcuenca del río San Antonio es un tributario del río Acelhuate y se constituye en la vertiente hidrográfica de recarga del acuífero de Nejapa. La misma se encuentra ubicada entre las coordenadas Latitud al *sur* 290000, en la zona norte del Boquerón del volcán de San Salvador, correspondiendo a la parte alta de la cuenca, al *norte* 302500, definido por las estribaciones norte del cerro de Nejapa y el cerro Las Mesas; y coordenadas Longitud al *oeste* 469500 en la zona del Boquerón y límite con la cuenca del río Sucio, y al *este* 477500 colindante con la microcuenca del río el Angel el cual pertenece a la cuenca del río Acelhuate. Estableciendo como punto de control de cierre de la cuenca, una referencia sobre el río San Antonio, antes de la curvatura del cauce dirección *Nor-este* hacia el *este*, en la proximidades del cerro de Nejapa; el área de la cuenca trazada es de 40.66 Km². La ubicación se encuentra en el mapa I.

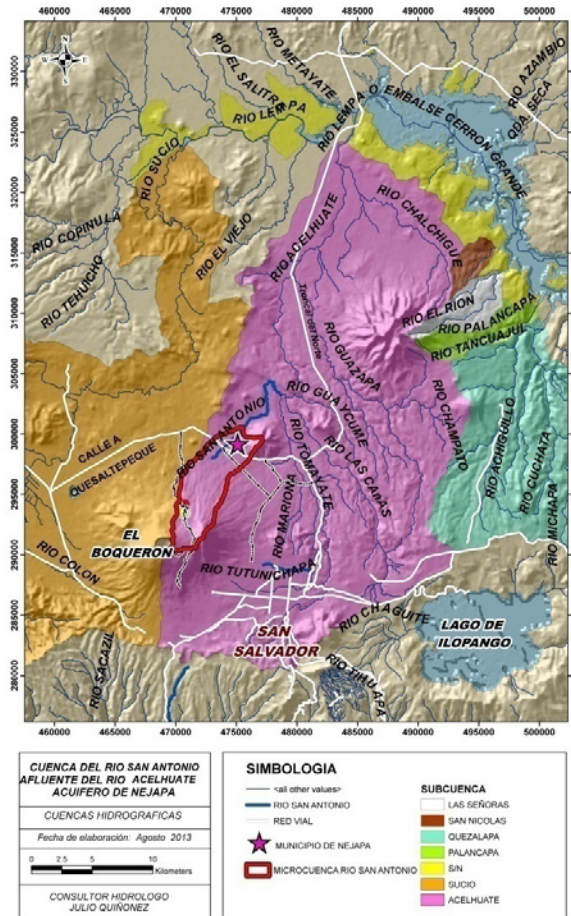
b. Climatología

La zona baja de la cuenca, próxima al cerro de Nejapa, se ubica entre las curvas 200 y 800 msnm en las proximidades de las estribaciones del volcán de San Salvador, y pertenece a la región climática de Sabana Tropical Caliente o Tierra Caliente, con temperaturas medias mensuales entre 22 y 28 °C, y con precipitaciones medias anuales entre 1200 mm y 1600 mm.

La zona media pertenece a la Sabana Tropical Calurosa o Tierra Templada, definida entre las elevaciones 800 msnm y 1200 msnm. La misma presenta precipitaciones medias anuales en el orden de las 1800 mm y temperatura medias mensuales entre 19 y 21 °C.

La parte alta de la cuenca, situada en la zona más alta del volcán de San Salvador, entre las elevaciones 1200 - 1800 msnm, pertenece a la climatología de Tierra Templada o Clima Tropical de Alturas, presentando temperaturas medias mensuales entre 14 y 19 °C y precipitaciones anuales superiores a los 1900 mm.

Mapa I
Ubicación cuenca río San Antonio

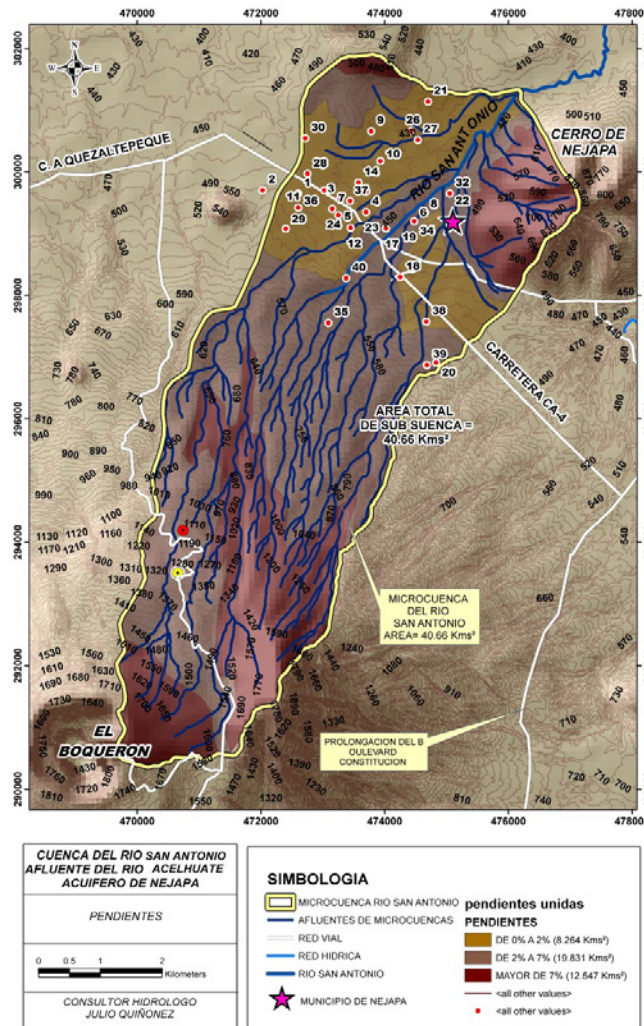


Elaboración propia en base a coberturas SIG-MARN

II.2 Fisiografía

La cuenca del río San Antonio presenta una fisiografía muy variable y claramente diferenciada en tres zonas características de pendientes que determinan su drenaje, velocidades de flujo y arrastre sedimentario. Una primera zona de pendiente se encuentra entre los rangos de 0% - 2% en la zona baja próxima a la carretera CA-4 y en el entorno de la parte urbana y suburbana. La misma posee grandes extensiones de planicies entre las elevaciones 420 msnm y 540 msnm, tal como se presenta en el mapa II, y posee una extensión de 8.264 Km².

Mapa II
Fisiografía de la cuenca



Elaboración en base a coberturas SIG-MARN

Una segunda zona con pendientes entre 2% - 7% se encuentra definida por segmentos en la parte media de la cuenca, con elevaciones comprendidas entre los 530 msnm - 630 msnm, y 920 msnm - 1300 msnm. La misma posee una extensión de 19.8 Km². Una tercera zona de pendientes corresponde a pendientes > 7%. La misma posee una extensión de 12.55 Km² y se ubica en el volcán de San Salvador, en las cercanías del picacho y sus estribaciones colindantes hacia el norte y noroeste con elevaciones superiores a los 1200 msnm hasta 1840 msnm en los puntos altos; en el

cerro de Nejapa y en la zona del boquerón donde se alcanzan elevaciones próximas a los 1700 msnm.

II.3 Tipo de Suelos

a. Andisoles

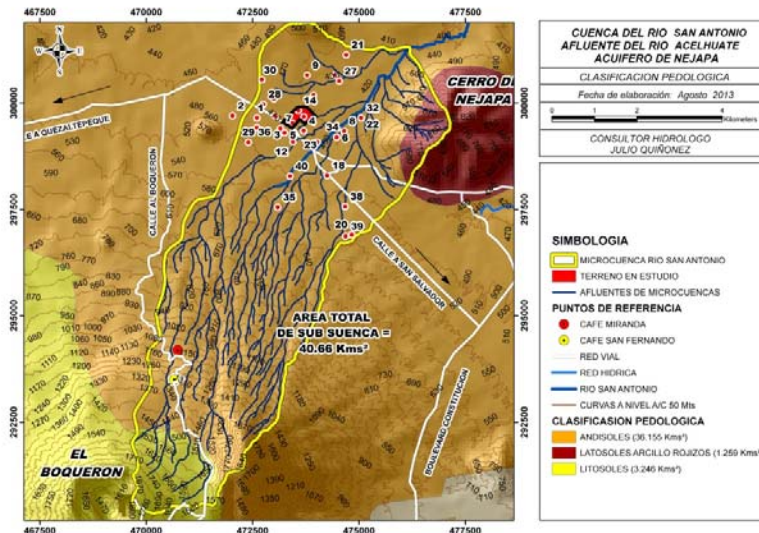
Los suelos característicos de la zona de estudio se presentan en el mapa III y son fundamentalmente Andisoles los cuales alcanzan una extensión de 36.16 Km².

Los suelos Andisoles son derivados de la geología volcánica reciente (formación San Salvador S_{4,r}, S₃, S₂) y poseen por lo general un horizonte superficial entre 20 y 40 centímetros de espesor, de color oscuro, rico en materia orgánica, textura franca y estructura granular. Son muy susceptibles a los efectos del clima, exposición a la erosión y usos inadecuados del suelo; lo cual ejerce una acción que va modificando sus propiedades y estructura. El horizonte inferior lo integran capas de ceniza volcánica de color claro, de textura franco arenosa fina y sin estructura.

Los suelos de mediano desarrollo tienen también un horizonte superficial oscuro, rico en materia orgánica, de textura franco limosa y de 40 ó más centímetros de espesor. El estrato inferior es de color rojizo amarillento, de textura franco arcillosa hasta profundidades de uno a dos metros. En general son suelos muy permeables y debido a ello los niveles freáticos se encuentran muy profundos en las regiones altas.

Cuando estos suelos "maduran" mucho a través del tiempo y se pierden, las estructuras y propiedades de ceniza volcánica van adquiriendo condiciones propias de otros suelos mas desarrollados como son los Latosoles.

Mapa III
Tipo de Suelos



Elaboración en base a coberturas SIG-MARN

b. Latosoles arcillosos rojizos

En el área de estudio, estos suelos tienen una presencia reducida alcanzando 1.26 Km² en la zona del cerro de Nejapa. Estos suelos se caracterizan por su textura arcillosa, frecuentemente de color café-rojizo aunque algunas veces amarillento o de color café oscuro en lomas y montañas. La coloración se debe principalmente a la presencia de minerales de hierro de distintos tipos y grados de oxidación. Son suelos bien desarrollados con estructura en forma de bloques. La textura superficial es franco arcillosa y el subsuelo arcilloso. La profundidad promedio es de un metro, aunque en algunos sitios de severa erosión puede aflorar la roca. Cuando están protegidos tienen horizontes superficiales oscuros de alto contenido de materia orgánica.

En general, la topografía de estas áreas varía de alomada hasta montañosa de pendientes fuertes y quebradas profundas. Los estratos inferiores son muy variables; lavas, lodos volcánicos, tobas y aun materiales volcánicos finos (cenizas, escoria volcánica y el "lapilli", un poco más grueso que la arena). El nivel de agua subterránea suele ser profundo. Su permeabilidad es muy buena siempre y cuando tenga una cubierta vegetal adecuada. De lo contrario la escorrentía es rápida y por lo tanto la erosión es fuerte, formándose surcos

profundos que reciben el nombre de cárcavas. Las áreas en donde la roca original es lava o lodos volcánicos son muy pedregosas.

c. Litosoles

Suelos de muy poca profundidad sobre roca pura y sus horizontes generalmente han sido truncados a causa de la severa erosión laminar, la cual ejerce un arrastre por el escurrimiento sin producir cárcavas. En algunos casos son suelos arcillosos como los Latosoles pero muy superficiales. En otros casos, como los presentes en el área de estudio en la zona del volcán de San Salvador, poseen texturas gruesas, tales como arenas y gravas sobre la roca dura; y con abundantes afloramiento rocosos dado que el material inferior son lavas o lodos volcánicos endurecidos. Poseen una alta permeabilidad debido a su textura arenosa gravosa. En el área de estudio se encuentran próximos al Boquerón en una extensión de 3.25 Km².

II.3 Usos del Suelo

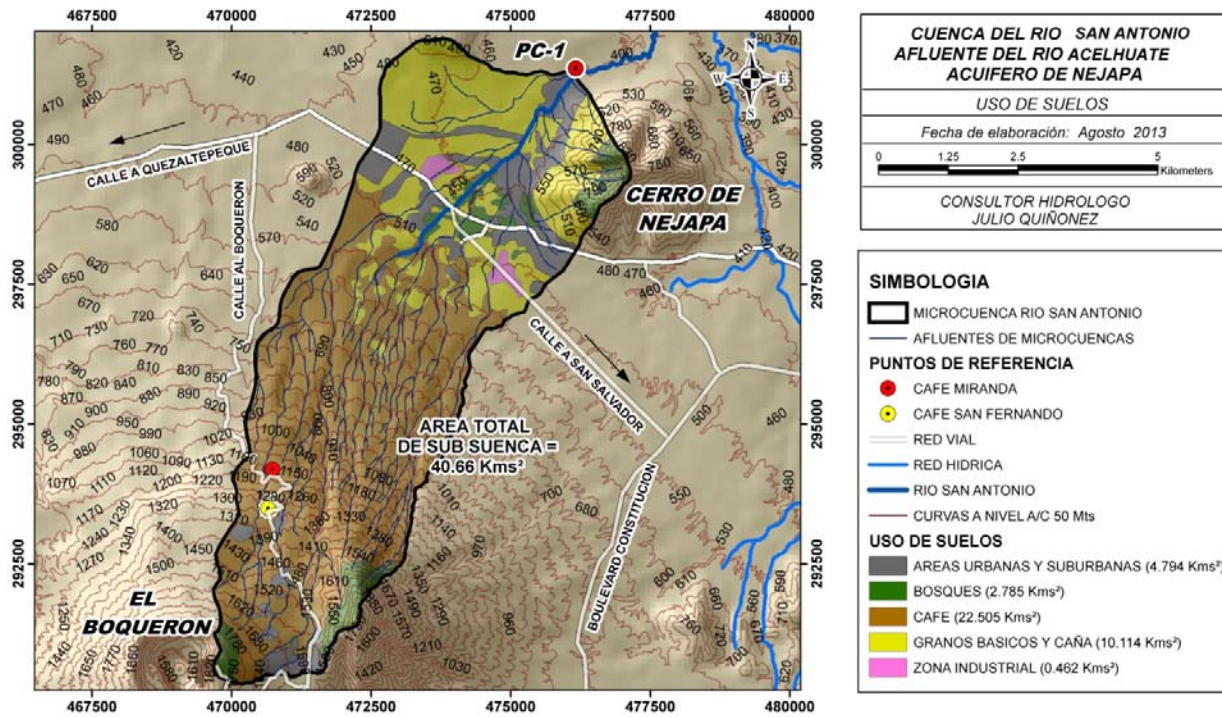
Los usos del suelo en la cuenca del río San Antonio se presentan en el mapa IV. El mismo se ha elaborado en base a los usos de suelo definidos a partir del programa del levantamiento de suelos Corin Land Cover- MARN 2002, en base a recorridos de campo efectuados en la cuenca de estudio tanto en la zona baja, media y alta; y en base a georreferenciación mediante aplicación Google Earth. Con ello, se ha hecho un esfuerzo por actualizar las condiciones de uso y verificar las dinámicas y tendencias que se experimentan en la zona.

Entre algunos aspectos, se pudo constatar una fuerte presión urbanística en la zona baja colindante a la carretera CA-4, caracterizada por la intervención de nuevos proyectos habitacionales, apertura de calles secundarias, planteles logísticos y bodegas que implican grandes áreas de impermeabilización y techos. De igual forma se ha verificado la ampliación de la frontera agrícola hacia la zona norte, en las estribaciones del volcán de San Salvador, donde se ha podido constatar nuevas áreas de plantación de caña de azúcar y cultivos temporales en diversos segmentos que se hacen presentes en la parte media de la cuenca.

Por otra parte, en la zona alta de la cuenca y principalmente en las colindancias de las "calles al volcán" y derivación de "calle al boquerón", se ha podido observar el incremento acelerado de nuevos núcleos suburbanos,

consistentes en restaurantes, cafés y estancias, apertura de calles secundarias, lotificaciones "ecoturísticas" para la edificación de "casas de campo", etc., que van paulatinamente modificando el entorno boscoso y de plantación de café con bosque de sombra históricamente existente en el lugar.

Mapa IV
Mapa de Usos de Suelo



Elaboración en base a Corin Land Cover MARN 2002, recorridos de campo agosto - septiembre 2013 e interpretación de imágenes georreferenciadas Google Earth 2011

La áreas determinadas de acuerdo al uso del suelo son las siguientes: áreas Urbanas y Suburbanas (4.80 Km²), Bosques (2.79 Km²), Café (22.51 Km²), Granos básicos y caña de azúcar (10.11 Km²), zona industrial (0.462 Km²). En la Imagen I de Google Earth se presenta la identificación de algunos sectores como zonas suburbanas (polígonos rojos y verdes) en la parte alta de la cuenca.

Imagen I

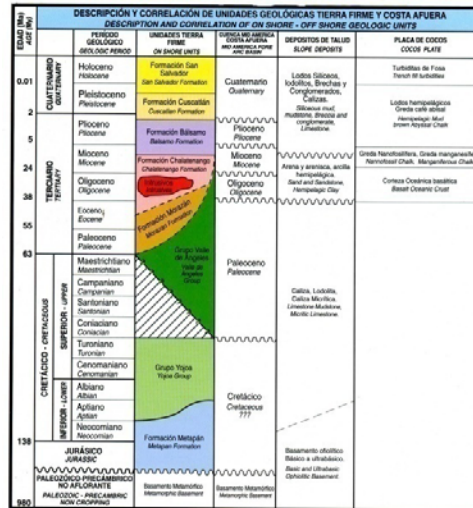
Polígonos en de Cambios de uso del suelo en la zona alta



II.4 Geología

La geología de la zona de estudio se caracteriza por la presencia de las formaciones San Salvador S_2 , S_{3a} , S_4 , S_{5b} ; Cuscatlán y Bálsamo b_1 y b_3 , pertenecientes, las dos primeras al cuaternario, en los periodos Pleistoceno y Holoceno respectivamente, y la formación Bálsamo, al Terciario del periodo Plioceno, tal como se ilustra en la gráfica I.

Gráfica I



Caracterización de las unidades geológicas,
 “Estudio de Caracterización de la Geología en la zona de la cordillera del Balsamo” Baxter, S. (2007).

En el mapa V se presenta las diversas formaciones y miembros geológicos característicos de la zona de estudio.

• **Formación Balsamo**

Pertenece a la edad del Mioceno-Plioceno

Miembro b₁

Epiclastitas volcánicas y piroclásticas e ignimbritas con lápilli de pómez, líticos y limo rojo, perteneciente al Plioceno superior.

Miembro b₃

Rocas efusivas básicas intermedias que corresponden al miembro superior de la formación.

• **Formación Cuscatlán**

Unidad geológica perteneciente al Plio-Pleistoceno, transcurrida de acuerdo a (Baxter, S.-2007) como una secuencia volcánico-sedimentaria y dividida en tres miembros: la inferior predominantemente félsica, seguido por lavas félsicas intermedias y volcánicas del tipo andesíticas-basálticas. Esta formación no se

presenta en la geología superficial de la zona de estudio, pero adquiere su importancia por su presencia como parte de las paredes confinantes próximas al cerro las Mesas, en la colindancia o frontera del acuífero, tal como se verá más adelante.

Miembro C₁

Piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas

Miembro C₃

Rocas efusivas básicas intermedias, tipo andesíticas y basálticas

- **Formación San Salvador**

Constituye la formación más reciente correspondiente al Cuaternario. Está compuesta por una secuencia de piroclastitas ácidas y efusivas ácidas-basálticas intercaladas. Se ubica en el Pleistoceno superior o reciente del Holoceno.

Miembro S₂

Corresponde a flujos y coladas de lava provenientes de la estructura volcánica de San Salvador de tipo andesítica basáltica o piroclásticas intermedias. Posee un tono café oscuro y una matriz fina incluyendo restos orgánicos y abundantes clastos de pómez incorporados en la matriz.

Miembro S_{3a}

Piroclastita ácidas y epiclastitas volcánicas descritas como "Tobas superiores de color café" provenientes de la caldera de Ilopango.

Miembro S₄

Formado por una secuencia volcánica de piroclastitas ácidas, lápilli, pómez y cenizas volcánicas provenientes de la caldera de Ilopango, cuya erupción ocurrió hace menos de 2000 años. Denominadas "tierra blanca", poseen una matriz con partículas de pómez, intercaladas con cenizas y finos, y con un significativo nivel de consolidación.

Miembro S_{5b}

Conocidos como conos de acumulación de escorias, lápilli y Cinder, se encuentran principalmente en las cercanías del cono volcánico de San Salvador.

Miembro Qf

Compuesto por depósitos sedimentarios del cuaternario que se presentan al pie de la zona oeste y noreste del cerro de Nejapa.

Mapa V

Formaciones y miembros geológicos presentes en la zona de estudio



SIMBOLOGIA

ZONA DE ESTUDIO

DESCRIPCIÓN

- Cráter, caldera
- Dique básico
- Escarpe de colada
- Estructura anular
- Falta supuesta
- Falta visible
- Fotolineación: estratificación

SIGNATURAS

- Epiclastitas volcánicas (fluviales)
- Escorias y cinder
- ⊗⊗⊗ Ignimbritas

Miembro geológico, descripción

- Qf San Salvador, Depósitos sedimentarios del Cuaternario, Depósitos acuáticos con intercalaciones de piroclastitas
- Qf San Salvador, Depósitos sedimentarios del Cuaternario, Depósitos coluviales sin ...
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli,
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli, sobre s3'a
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli, sobre s4
- s5b San Salvador, Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder),
- s5a San Salvador, Efusivas básicas - intermedias,
- s4 San Salvador, "Tierra blanca"; piroclastitas ácidas y apiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas (s3'b),
- s3a San Salvador, Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café"),
- s2 San Salvador, Efusivas básicas -intermedias, piroclastitas subordinadas,
- s1 San Salvador, Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas básicas -intermedias,
- c3 Cuscattán, Efusivas básicas-intermedias,
- c2 Cuscattán, Efusivas ácidas y intermedias ácidas (ocurrencias aisladas en parte eventualmente =ch2),
- c1 Cuscattán, Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas,
- b3 Bálsamo, Efusivas básicas-intermedias,
- b1 Bálsamo, Epiclastitas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas -intermedias intercaladas,

III. FORMACIONES HIDROGEOLOGÍCAS, MODELO Y ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

En este apartado se presentan las formaciones hidrogeológicas que caracterizan al acuífero de Nejapa, en cuanto a su distribución espacial, rendimiento y capacidad acuífera; así como los límites, dirección de las líneas de flujo subterráneo y barreras de confinamiento tanto lateral como en su basamento.

Para ello se presenta el modelo de acuífero desarrollado en el proyecto de investigación de tesis (Gil, L. 2007), el cual se modeló en base a la realización de una serie de sondeos eléctricos verticales (SEV), los cuales se correlacionaron con los ejecutados en el estudio de prospección geofísica del municipio de Nejapa (Estrada, P. 1975); obteniéndose similares resultados en ambos estudios, y una buena correlación entre los estratos y formaciones identificadas, y las resistividades determinadas. Aunado a ello, se tuvo en cuenta la geología superficial, los niveles estáticos en pozos y la descripción de columnas litológicas de algunos pozos perforados.

Posteriormente se presenta un análisis de las características del acuífero encontradas de la modelación; y de los parámetros hidrogeológicos del acuífero, obtenidos a partir de los datos e información de pozos perforados y en operación en la zona de estudio.

III.1 Formaciones hidrogeológicas

III.1.1 Unidad hidrogeológica en acuífero porozo de productividad media o baja constituido por depósitos piroclásticos del Cuaternario.

Están constituidos por materiales piroclásticos aglomerados del cuaternario (pómez, lápilli y tobas), con predominancia de cenizas volcánicas o "tierra blanca" y determinados por la formación San Salvador S₄ y S_{3a}, los cuales presentan una granulometría que varía de fina a gruesa y con conductividades de medias a bajas, como consecuencia del grado de compactación granular y consolidación.

En general constituyen acuíferos de bajo rendimiento y conforman los estratos superficiales, presentes en la geología superficial de la zona baja, con espesores

entre los 12mts y 50 mts. Generalmente esta unidad acuífero es aprovechado únicamente por pozos excavados artesanalmente, encontrándose su nivel estático entre los 6 y 20 mts de profundidad.

Es un acuífero libre, no confinado y somero; pero constituye el estrato de semi confinamiento que sobre yace a la unidad de acuífero de alto rendimiento y productividad que se conoce como acuífero fisurado o de lavas fracturadas del cuaternario, constituido por la formación S₂.

III.1.2 Unidad hidrogeológica en acuífero fisurado o lavas fracturadas del cuaternario de alta productividad.

Esta unidad la constituyen principalmente rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con intercalaciones de materiales piroclásticos, pertenecientes a la formación San Salvador S_{5b} y principalmente S₂. Estas rocas volcánicas se hacen presentes a través de flujos y coladas de lavas provenientes de la estructura volcánica y presentan conductividades de medianas a altas como consecuencia de su conductividad secundaria o fracturamiento existente.

En general, tal como se observa en el mapa geológico, estas formaciones afloran en la parte media y alta de la cuenca, constituyéndose en un acuífero libre, pero con el inconveniente de encontrarse sus niveles freáticos a grandes profundidades; por lo que en esa parte de la cuenca su función esencial es la recarga hídrica del sistema dada su alta permeabilidad y demás condiciones hidrofísicas (tipo de suelos, pendientes, usos del suelo y condiciones meteorológicas). Luego del proceso de la infiltración se genera las líneas de flujo subterráneo en dirección SO - NE y S-N hacia los estratos profundos de la zona baja o de aprovechamiento la cual está constituido primordialmente por la misma formación S₂.

En la zona baja esta formación se constituye en un acuífero semiconfinado debido a que subyace a las formaciones S₄ y S_{3a}. Dada sus altas conductividades hidráulicas, gradientes y transmisibilidad, el acuífero es de alto rendimiento; siendo sobre el mismo donde se encuentran la mayoría de los pozos perforados. De acuerdo a la modelación tal como se verá más adelante, el acuífero posee espesores entre los 80 y 180 mts, encontrándose a partir de dichas profundidades, el basamento impermeable.

III.1.3 Unidad hidrogeológica de rocas con poca capacidad acuífera.

Esta unidad está constituida por los miembros de la formación Cuscatlán C₁ y C₃ y la formación Bálsamo b₁ y b₃. Se consideran rocas no explotables hidrológicamente debido a la baja permeabilidad y almacenamiento que presentan, dado su alto nivel de consolidación, sus estratos arcillosos, meteorización y compactación. Sin embargo tienen la función esencial de

constituirse en los cuerpos confinantes del acuífero y en delimitar el área de explotación.

III.2 Modelo conceptual del acuífero de Nejapa.

De acuerdo a los sondeos eléctricos verticales (SEV), a los niveles estáticos en pozos de observación, a los perfiles litológicos de los pozos analizados, y a la caracterización de la geología superficial; que se llevó a cabo en el marco del trabajo de investigación de tesis (Gil, L. 2007), se delimitó, modeló y caracterizó el comportamiento del acuífero de Nejapa.

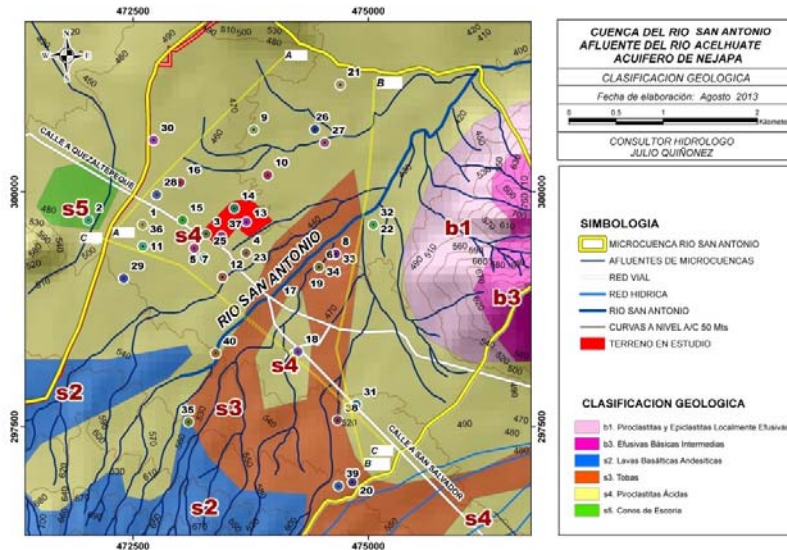
Los aspectos centrales derivados de la modelación del acuífero y su valoración en cuanto a su delimitación y capacidad de explotación, se expresan a continuación:

a. Modelo del acuífero de Nejapa

La delimitación del acuífero de Nejapa es uno de los aspectos fundamentales que puede derivarse de la prospección geoelectrica y de la caracterización hidrogeológica de la unidades acuíferas que se indicó anteriormente.

En el mapa VI se presenta la delimitación inferida del acuífero y las secciones A-A, B-B y C-C trazadas a partir del programa de sondeos. En las figuras 1, 2 y 3 se presentan las secciones determinadas que reflejan la estratigrafía de las formaciones geológicas definidas mediante correlación de resistividades y niveles de saturación del suelo.

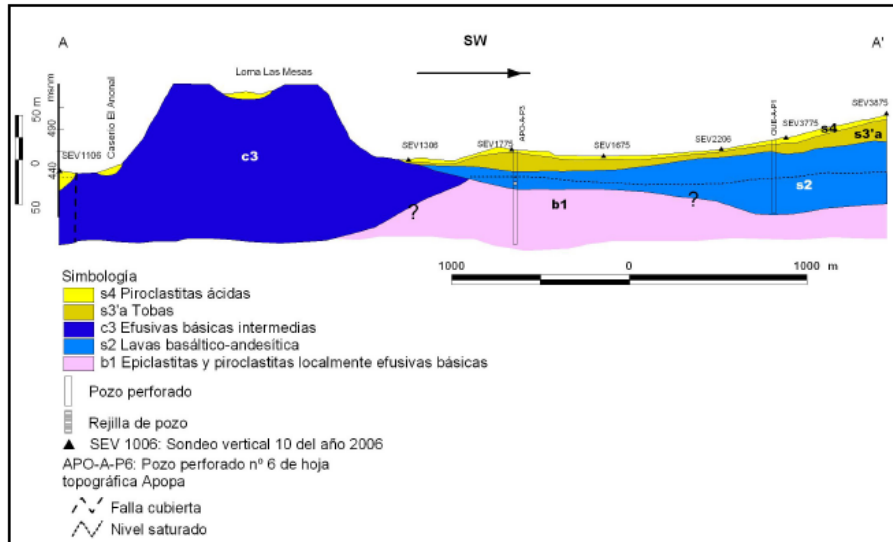
Mapa VI
Zona de delimitación del acuífero y secciones de sondeo geoelectrías



En la figura 1 puede observarse la sección A-A trazada en dirección SO - NE, entre el cerro Las Mesas al noreste y un punto al SE cercano a la carretera que conduce a Quezaltepeque. Puede observarse que el espesor del estrato acuífero de alto rendimiento S_2 va disminuyendo conforme se acerca al Cerro Las Mesas, hasta alcanzar espesores cercanos a los 25 - 30 mts y una profundidad próxima a los 70 mts para alcanzar el estrato confinante o basamento b_1 . Es decir, en esa zona, la explotación del acuífero profundo se va limitando paulatinamente reflejando moderadas a bajas transmisibilidades y reducidos caudales, tal como es el caso del pozo de la hacienda Atalpo que se encuentra al norte de dicha zona y posee una $T=14$ $\text{m}^2/\text{día}$ con un caudal de $Q=3.2$ l/s, a diferencia del pozo 9 de ANDA que se encuentra en la zona sur de la sección, el cual presenta $T = 555$ $\text{m}^2/\text{día}$ con un caudal $Q=85.17$ l/s y con un espesor acuífero de 80 - 100 mts. El estrato semi confinante compuesto por S_{3a} y S_4 mantienen un espesor promedio en el orden de los 12 - 50 mts, que es el espesor del cual se abastecen los pozos excavados artesanalmente, tal como se ha indicado.

Esta zona norte de reducción del espesor del acuífero en la formación S_2 estaría indicando el límite natural del acuífero al encontrarse próximo a las paredes de la formación C_3 en las cercanías del cerro Las mesas.

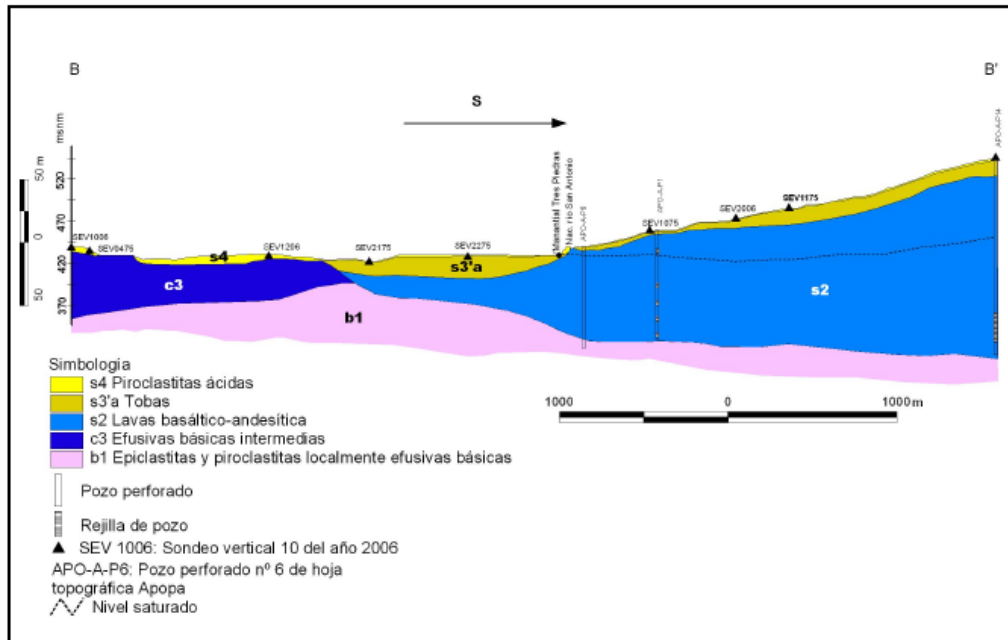
Figura 1
Sección A-A



Sección A-A Correlación en base a prospección geoelectrica Gil, L. 2007

La figura 2 muestra la sección B-B la cual se ubica en dirección sureste -noroeste (SE - NO). Puede observarse que el espesor acuífero va decreciendo significativamente hacia el norte y creciendo hacia el sur, en dirección hacia las estribaciones del volcán de San Salvador, donde la formación cuaternaria de lavas fracturadas S_2 , alcanza espesores en el orden de los 180 mts.

Por otra parte la línea punteada muestra la línea de nivel saturado que va ligeramente ascendiendo hacia el volcán y descendiendo hasta su punto de descarga, en el cual conforma el nacimiento Tres Piedras, que es el nacimiento principal del río San Antonio. Esto demuestra la interacción directa entre el nivel freático del acuífero subterráneo y los flujos naturales del río San Antonio, de tal forma que cualquier desequilibrio o sobreexplotación del acuífero subterráneo impactará directamente en una disminución del nivel freático y por consiguiente en una reducción significativa de los flujos de vertiente del nacimiento tres piedras, donde ANDA posee una de sus principales captaciones de agua en el acuífero de Nejapa.

Figura 2
Sección B-B

Sección B-B Correlación en base a prospección geoelectrónica Gil, L. 2007

Hacia el norte y noroeste, puede verificarse nuevamente la reducción del espesor acuífero definido por la formación piroclástica de lavas fracturadas S_2 , la cual encuentra su confinamiento dado por el basamento de la formación terciaria bálsamo b_1 , la formación Cuscatlán C_3 que aflora en el Cerro Las Mesas y subyace a la formación de la geología superficial San Salvador S_4 y S_{3a} en las cercanías del pozo de la hacienda Atalpo tal como se ha indicado, y por las formaciones b_1 del cerro de Nejapa. Más allá de estos límites la explotación hídrica por medio de pozos profundos es limitada o nula, presenciándose generalmente pozos excavados artesanalmente que aprovechan el acuífero somero.

A partir de ello, se establece como límite del acuífero profundo, la zona definida en las proximidades de la latitud 301000, lo cual coincide con el trazo de la cuenca superficial en la zona norte, que se presentó en el mapa VI.

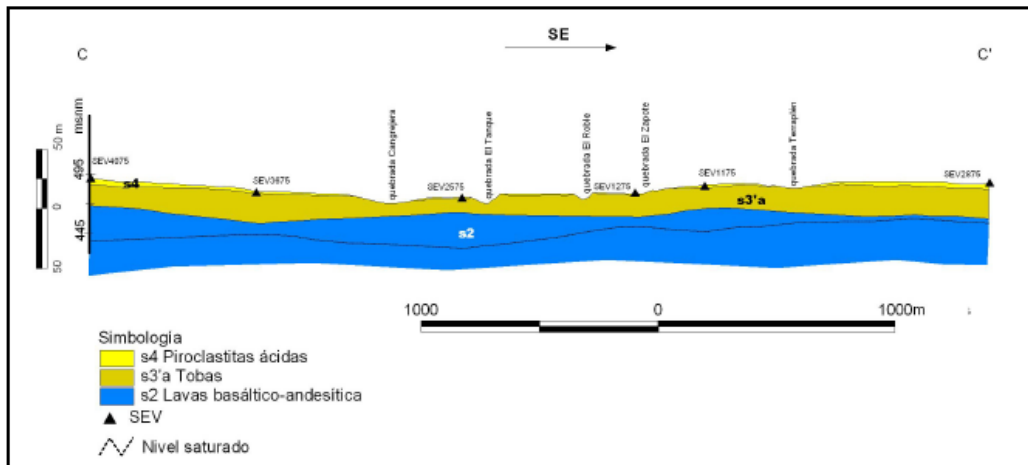
La sección C-C que se muestra en la figura 3 se ubica al sur del acuífero en la dirección Oeste-Este (OE), paralela a la calle que conduce a Quezaltepeque.

A partir de este perfil puede observarse el estrato piroclástico S_4 y S_{3a} proveniente de la actividad volcánica de la caldera Ilopango que sobre yace en un

espesor de 20 - 50 mts., a los flujos lávicos de la formación S₂ provenientes del volcán de san Salvador.

Tal como se ha mencionado anteriormente, esta formación subyacente va ascendiendo en dirección al volcán de San Salvador, hasta su afloramiento a partir de los 500 msnm aproximadamente. En esa zona el acuífero deja de ser semiconfinado y se vuelve un acuífero libre, pero con el inconveniente de encontrarse su nivel saturado a grandes profundidades, por lo que su acceso se vuelve dificultoso y de altos costes. Muestra de ello, se refleja en los pozos perforados al sur de la carretera que conduce hacia Quezaltepeque, los cuales presentan profundidades próximas o mayores a los 220 mts., y niveles saturados que se encuentran a profundidades en el orden de los 100 a 140 mts, tal como es el caso de los pozos ubicados en la estación central #1 y #2 de ANDA.

Figura 3
Sección C-C



Sección C-C Correlación en base a prospección geoelectrica Gil, L. 2007

A través del análisis de los niveles piezométricos y su variabilidad estacional (época lluviosa y época seca), de los pozos perforados y excavados en las cercanías de los límites Este y Oeste, pudo determinarse que los mismos drenan en dirección al río San Antonio. Es decir, las líneas de flujo subterráneo,

obtenidas a partir de las curvas isofreáticas, en la parte Este y Oeste, se presentan desde los límites de la cuenca trazada hacia el cauce del río San Antonio.

b. Delimitación del acuífero de Nejapa

A partir del análisis del modelo del acuífero, pueden establecerse los límites del mismo, como coincidentes con los límites de la cuenca trazada en la parte baja, tal como se muestra en el mapa VI.

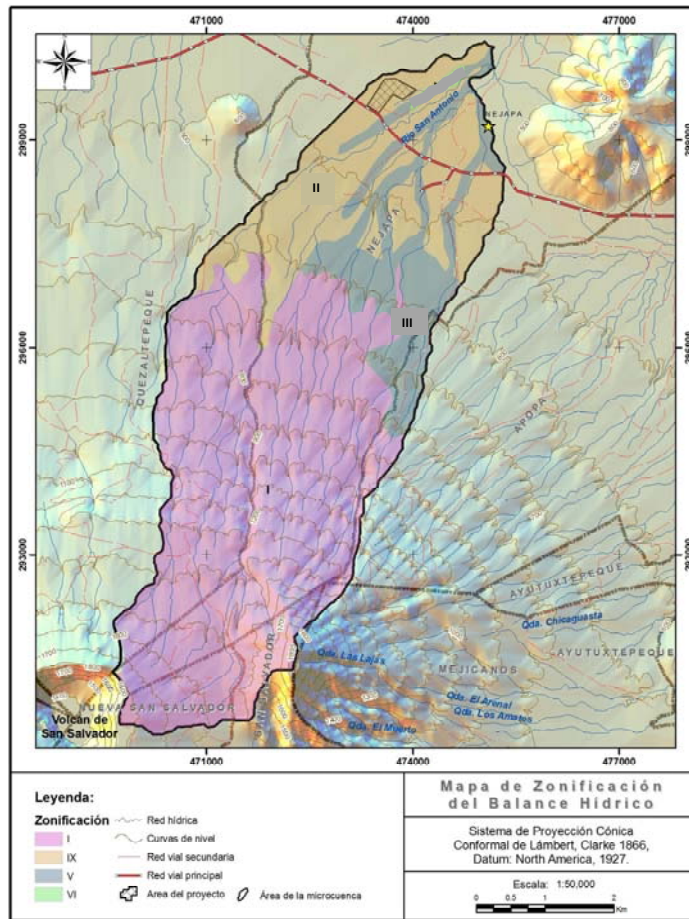
Al Este, el límite se establece en el parte aguas con la cuenca del río Sucio; al Oeste, el límite se establece con la cuenca del río el Angel; al Norte y Noreste, el límite se establece por las formaciones cuaternarias antiguas del cerro Las Mesas y la formación bálsamo del cerro de Nejapa; y al Sur en las proximidades de la curva de elevación 550 msnm.

III.3 Delimitación equívoca del acuífero en el estudio hidrogeológico del EIA-ILC

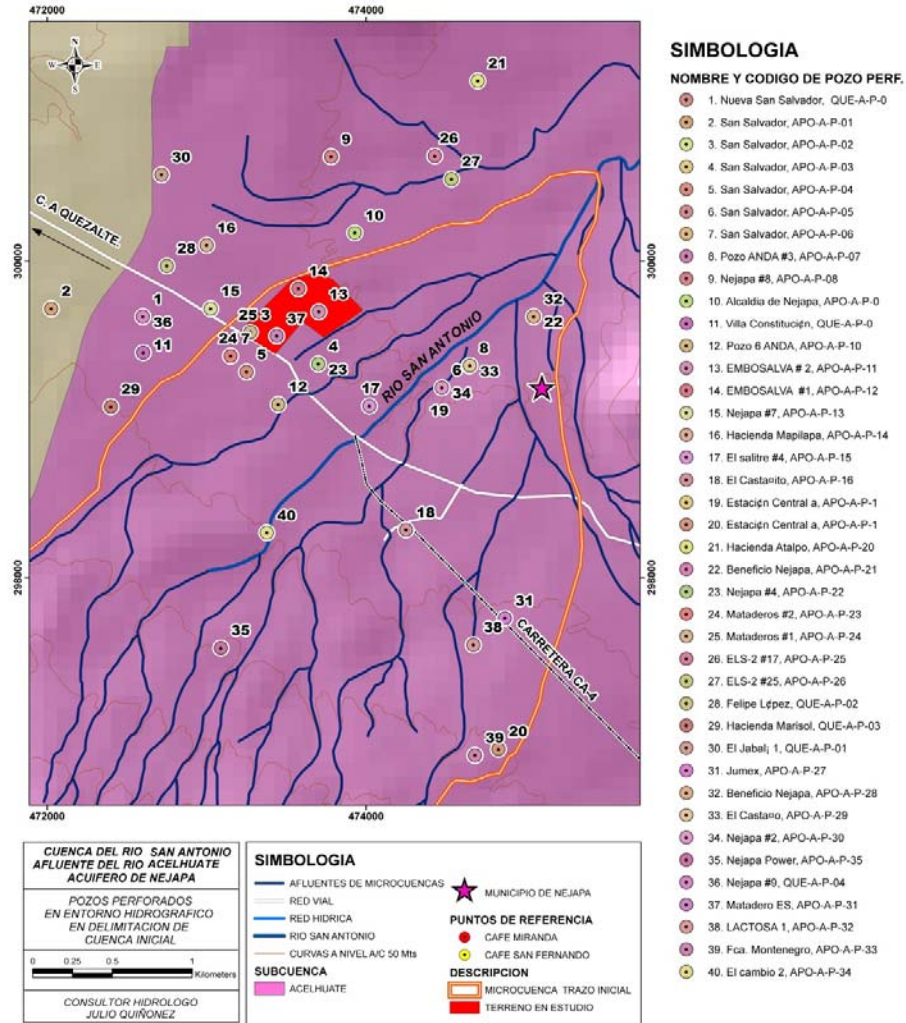
El trazo de la cuenca del río San Antonio efectuada en el estudio hidrogeológico del EIA-ILC se presenta en el mapa VII y el área total de la misma, calculada en dicho estudio es 29.4 Km².

En el mismo no se refleja adecuadamente la incorporación de los límites hidrogeológicos del acuífero de Nejapa tal como se ha indicado en la modelación desarrollada, de tal forma que el *parte aguas* trazado en la parte baja de la cuenca, excluye una zona significativa del acuífero, y por consiguiente, deja por fuera una cantidad importante de pozos perforados que constituyen una parte esencial de la demanda y extracciones totales. Entre ellos, importantes pozos de ANDA como son Nejapa No.7, No.8 y No.9, tal como se muestra en el mapa VIII.

Mapa VII
Delimitación de la cuenca en el estudio hidrogeológico EIA-ILC



Mapa VIII
Reproducción del trazo de la cuenca del EIA-ILC y su no inclusión de importantes pozos



La no inclusión de ese importante segmento hidrográfico del acuífero en la cuenca general del río San Antonio, supondría que el mismo carece de zona de recarga, o bien, que su recarga hídrica le proviene únicamente de la infiltración directa en su superficie, la cual es mínima dado que se trata de estratos confinantes de baja permeabilidad e inmersos en un entorno urbano y suburbano. En general, esta condición de no incluir esa parte importante de la región hidrográfica del acuífero de lavas fracturadas y de alta productividad; se encuentra totalmente alejada del comportamiento hidrológico dentro de un enfoque de cuenca y no podría llevarse, a partir de ello, un adecuado desarrollo del balance hídrico, especialmente en lo concerniente al cálculo de la demanda y extracciones reales del acuífero.

En el cuadro I se presentan los pozos presentados en el mapa VIII y recopilados en base a los inventarios presentados tanto en el EIA-ILC, como de otros estudios antecedentes. En el mismo se indican los pozos que el estudio de EIA-ILC ha dejado "fuera" de su área de estudio. Por otra parte se presentan las características hidrogeológicas de los mismos y su caudal de explotación en lts/seg.

Cuadro I
Pozos perforados en el acuífero de Nejapa

No. en mapa	Código	Código	Coordenadas		Prof. (mt)	Coeficiente de alma. (S)		Elevacion (msnm)	NEstático (m)	Nivel Piezom (msnm)	Q (l/t)	Ubicación considerada en el EIA-ILC
			X	Y		Transmisibilidad (T) mt ² /día						
1	Nueva San Salvador	QUE-A-P-05	472600	299650				490,00	24,38	465,62	25,00	Fuera
2	San Salvador	APO-A-P-01	472025	299700				465,00	24,38	440,62	20,00	Fuera
3	San Salvador	APO-A-P-02	473275	299550				510,00	24,38	485,62	12,62	Dentro
4	San Salvador	APO-A-P-03	473700	299350				520,00	24,38	495,62	15,00	Dentro
5	San Salvador	APO-A-P-04	473250	299300				480,00	56,39	423,61		Dentro
6	San Salvador	APO-A-P-05	474475	299200				450,00	48,3	401,7	30,00	Dentro
7	San Salvador	APO-A-P-06	473150	299400				510,00	16,9			Dentro
8	Pozo ANDA #3	APO-A-P-07	474645	299338	131,00		2830					
9	Nejapa #8	APO-A-P-08	473780	300660	106,00	0,001	540,00	456,00	55,32	400,68	72,00	Fuera
10	Alcaldía de Nejapa	APO-A-P-09	473929	300179	150,00	0,00238	173					Fuera
11	Villa Constitución	QUE-A-P-06	472602	299421	186,00	0,0318	36,29					Fuera
12	Pozo 6 ANDA	APO-A-P-10	473449	299095	80,00		139,42					Dentro
13	EMBOSALVA # 2	APO-A-P-11	473703	299681	76,22	0,01	48,00	463,00	25,91	437,09	9,45	Dentro
14	EMBOSALVA #1	APO-A-P-12	473575	299827	182,70	0,0016	73,00	465,00	31,04	433,96	37,80	Dentro
15	Nejapa #7	APO-A-P-13	473025	299700	252,40			465,00	24,38	440,62	85,17	Fuera
16	Hacienda Mapilapa	APO-A-P-14	473000	300100	252,00			465,00	25,4	439,6	85,17	Fuera
17	El salitre #4	APO-A-P-15	474020	299085	91,00			438,88	27,2	411,68		Dentro
18	EL Castaño 1 (El Castaño)	APO-A-P-16	474250	298300	50,00			480,00	48,3	431,7		Dentro
19	Estación Central al #2	APO-A-P-18	474475	299200	232,00		193,00	549,00	134	415	65,61	Dentro
20	Estación Central al #1	APO-A-P-19	474829	296913	213,00	0,0239	171-271	549,00	139	410	65,61	Fuera
21	Hacienda Atalpo	APO-A-P-20	474700	301140	147,56	2,2*10E-08	14,00	440,00	53	387	3,15	Fuera
22	Beneficio Nejapa	APO-A-P-21	475050	299650	79,00	0,015	1407,00	435,00	1,6	433,4	27,70	Fuera
23	Nejapa #4 (La granja)	APO-A-P-22	473700	299350	91,44 - 119,7	0,001	76 - 26	520,00	56,39	463,61		Dentro
24	Mataderos #2	APO-A-P-23	473150	299400	76,20		310,00	510,00	28,5	481,5	6,31	Dentro
25	Mataderos #1	APO-A-P-24	473275	299550	78,64			510,00	24,38	485,62		Dentro
26	ELS-2 #17	APO-A-P-25	474430	300665	125,00			433,00	7,51	425,49		Fuera
27	ELS-2 #25	APO-A-P-26	474535	300520	90,00			433,00	2,54	430,46		Fuera
28	Felipe López	QUE-A-P-02	472750	299970	40			473,00	33,00	440,00		Fuera
29	Hacienda Marisol	QUE-A-P-03	472400	299080				533,00	85,62	447,38		Fuera
30	El Jabali 1	QUE-A-P-01	472717	300547	164,63	0,10	38,00	465,00	60,75	404,25	9,15	Fuera
31	Jumex	APO-A-P-27	474870	297742							15,00	Dentro
32	Beneficio Nejapa	APO-A-P-28	475050	299650	79,0		1407,00	430,41	1,60	428,81	27,70	Fuera
33	Ing. El Castaño (1975)	APO-A-P-29	474650	299340	131,10			443,69	17,70	425,99		Dentro
34	Hda. El Cast 2 - Nejapa #2	APO-A-P-30	474475	299200	109,70		2830,00	442,72	16,90	428,82	65,61	Dentro
35	Nejapa Power	APO-A-P-35	473089	297553	198,78		48,84	551,70	67,00	484,70	12,99	Dentro
36	Nejapa #9	QUE-A-P-04	472600	299650	204,20		555,00	476,36	24,38	451,98	85,17	Fuera
37	Matadero ES	APO-A-P-31	473439	299526	79,00		229,62	458,98	29,00	429,98	18,93	Dentro
38	LACTOSA 1	APO-A-P-32	474672	297573	167,68			513,14	83,84	429,3	2,21	Dentro
39	Fca. Montenegro	APO-A-P-33	474682	296874	140,00			560,28	86,00	462,28		Fuera
40	El cambio 2	APO-A-P-34	473377	298282	204,30			491,69	25,00	466,69		Dentro
	Otros pozos no incluidos en el mapa pero pertenecen a la cuenca de estudio											
	Ingenio San Esteban		475134	300861	125,00			430	4,30	425		
	Hda. Mapilapa no. 1		475452	301242	143,00				25,60			
	Nejapa # 8 (2)		473873	300801	293,00			451,6	23,88	427,2		
	El Coyolito		473923	300207		0,00238	173				72,00	
	2 de mayo		476948	304085	40,00				8,00			

IV. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RIO SAN ANTONIO

El balance hídrico en la cuenca del río San Antonio se ha elaborado mediante dos metodologías de análisis. El primer desarrollo se lleva a cabo mediante la aplicación de la metodología (G.Shusinsky - Losilla 2000), la cual fue aplicada en el estudio hidrogeológico del EIA-ILC. La segunda metodología se basa en la aplicación de coeficientes de precipitación - escurrimiento (P-E) obtenidos para las diferentes zonas hidrográficas en el país, las cuales se han determinado como regiones hidrológicamente homogéneas con similares condiciones en cuanto a la fisiografía, tipo de suelos, geología y usos del suelo. Esta metodología fue aplicada y calibrada para la obtención de dichos factores, en el desarrollo del "Balance Hídrico y Dinámico de El Salvador" SNET-2005.

IV.1 Método G. Shusinsky 2000 para el cálculo del Balance Hídrico.

El método de Shusinsky 2000 fue desarrollado para el cálculo de la infiltración a partir de las condiciones fisiográficas de los suelos y meteorológicas de la cuenca; donde las condiciones que posibilitan la infiltración (I) están en función de las condiciones de la pendiente del terreno (Kp), usos de suelos (Kv) y textura de los suelos asociada a su procedencia geológica (Kfc). Adicionalmente, antes de producirse la infiltración, existe una retención (Ret) dada por la vegetación o follaje existente que intercepta una parte de la precipitación (P).

Dicha retención viene dada por:

$Ret = P \times Cfo$, donde Cfo es un factor que varía entre 0.12 - 0.20 en función de la cobertura existente.

Para bosques Cfo= 0.2

Para arbustos, otros Cfo = 0.12

El método considera que al menos 5mm serán retenidos por la biomasa vegetal cuando la lluvia sea mayor de 5mm, y cuando la lluvia mensual sea menor de 5mm, todo lo que llueve será retenido sin que exista infiltración.

- **Cálculo de la lluvia potencial de infiltración**

La lámina de lluvia potencial de infiltración viene dado por:

$$P_i = P - Ret$$

- **Cálculo de la Infiltración (I)**

La infiltración (I) viene dado por:

$$I = (P - Ret) * (C) = C_{fo} * C * P$$

Donde

(C) = es el índice de infiltración (adimensional)

$$C = K_p + K_v + K_{fc}$$

Donde

K_p es la fracción que infiltra por efecto de la pendiente

K_v es la fracción que infiltra por efecto de los usos del suelo

K_{fc} es la fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo

El método define K_{fc} como:

$$K_{fc} = 0.267 \ln fc - 0.000154fc - 0.724 fc$$

Donde

fc es la tasa de infiltración o velocidad de infiltración característica en función de la textura de los suelos, dada en (mm/día).

- **Calculo de la Humedad inicial (H_{si})**

El calculo de la humedad inicial viene dado por la siguiente fórmula

$$H_{si} = \frac{CC * PR * DS}{100}$$

Donde: CC = capacidad de campo (%)

PR = Profundidad de las raíces o zona radicular de acuerdo a la vegetación

DS= densidad del suelo (gr/cm³)

- **Calculo de Evapotranspiración real (ETR)**

$$ETR = \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \right) ETP$$

Donde C_1 Coeficiente antes de la ETR

$$C_1 = \frac{Hsi - PM + Pi}{CC - PM}$$

C_2 = Coeficiente después de la ETR

$$C_2 = \frac{Hsi - PM + Pi - (ETP * C_1)}{CC - PM}$$

ETP Evapotranspiración potencial proveniente de las estaciones meteorológicas

PM = Punto de Marchitez

Pi = Lámina de agua que se infiltra

- **Humedad disponible del suelo (HD)**

$$HD = Hsi - PM + Pi$$

- **Humedad final en el suelo (Hsf)**

$$Hsf = Hsi + Pi - ETR$$

- **Recarga al Acuífero (Rp)**

$$Rp = Hfs - CC$$

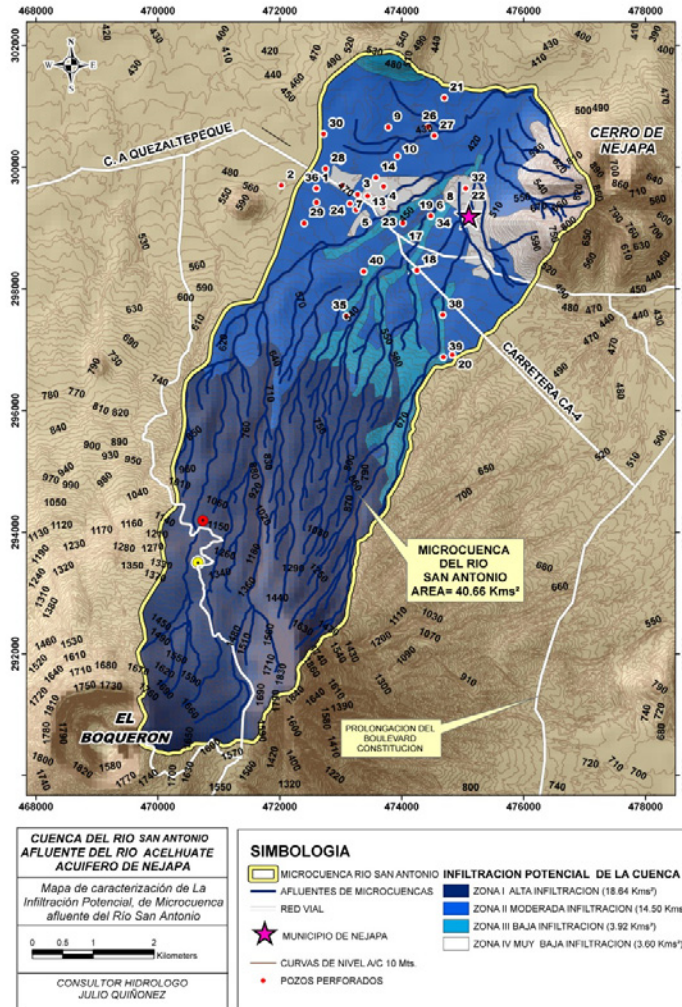
Para que exista recarga al acuífero se requiere que la humedad final sea mayor a la Capacidad de Campo del suelo, pues de lo contrario no habría recarga al acuífero.

IV.2 Cálculo del Balance Hídrico en la cuenca del río San Antonio mediante el método Shusinsky 2000.

Para el desarrollo del balance hídrico, la cuenca del río San Antonio (40.66Km²) se dividió en cuatro zonas de estudio, tal como se presenta en el mapa IX. Dichas zonas se establecieron a partir del potencial de infiltración en función de sus condiciones fisiográficas, geología y usos del suelo. Adicionalmente se tomó en cuenta su comportamiento hidrológico y el establecimiento de las zonas de recargas y aprovechamiento que se determinaron a partir del modelo hidrogeológico del acuífero.

- La zona I constituye la parte alta de la cuenca que comprende desde el boquerón hasta el interface entre las formaciones geológicas S₂ y S₄. Es la zona primordial de recarga hídrica debido a su formación geológica, alta permeabilidad y su amplia cobertura arbórea, y por consiguiente se considera como zona de alta infiltración. Su extensión es de 18.64 Km².
- La zona II comprende la parte media y baja, con moderadas y bajas pendientes, moderada a baja cobertura arbórea y con una formación geológica semipermeable (S₄). Su extensión se ha determinado en 14.50 Km² y se considera una zona de moderada infiltración.
- La zona III comprende básicamente la formación S_{3a} la cual se caracteriza por su baja permeabilidad y con intercalaciones en la formación S₄. Se ubica en la parte media en zonas de moderada cobertura arbórea, presencia de cultivos y zonas suburbanas. Sus pendientes son moderadas a bajas y su extensión es de 3.92 Km². Se considera una zona de baja infiltración.
- La zona IV comprende algunas de las formaciones más antiguas que afloran en la zona, principalmente las próximas al cerro de Nejapa y se encuentra inmersa en un entorno urbano y suburbano. Se constituye en una zona de escasa o muy baja permeabilidad y su extensión se ha determinado en 3.60 km²

Mapa IX
Mapa de zonas de capacidad de infiltración



a) Cálculo de los factores que determinan la infiltración I.

Los factores que determinan la infiltración (I), tal como el método lo establece son la pendiente K_p , los usos del suelo K_v , y la textura del suelo K_{fc} .

a.1) Cálculo de factor de Pendiente (K_p)

Para el cálculo del factor de pendiente K_p se llevó a cabo un análisis de las condiciones de pendientes en la zona de estudio en base a la cartografía SIG disponible, clasificándolas en tres zonas

características, de acuerdo a los rangos presentados en la tabla 1 por Shosinsky 2000y en base al mapa fisiográfico II, presentado en el apartado II.

Tabla 1

Rangos de pendiente	Kp propuesto
Muy Plana 0,02% - 0,06%	0,3
Plana 0,3% - 0,4%	0,2
Algo plana 1% - 2%	0,15
Promedio 2% - 7%	0,1
Pendiente fuerte > 7%	0,06

Shosinsky 2000

En la tabla 2 se presenta la caracterización de los rangos de pendientes obtenidos en la cuenca de estudio para cada una de las zonas de estudio.

Tabla 2

Caracterización de las pendientes en la cuenca del río San Antonio						
Rango de Pendientes	Área de Caracterización de pendientes	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Áreas por zona
		18,64	14,5	3,92	3,6	40,66
0 - 2 %	8,28	0,8	5,78	0,95	0,75	8,28
2% - 7%	19,83	12,74	4,7	1,45	0,94	19,83
> 7%	12,55	5,1	4,02	1,52	1,91	12,55
	40,66	18,64	14,5	3,92	3,6	40,66

En las tablas subsiguientes 2.1, 2.2, 2.3, y 2.4 se presentan los valores de los Kp ponderados para cada una de las cuatro zonas donde se realizará el balance hídrico de la cuenca del río San Antonio.

Tabla 2.1

Cálculo del Kp ponderado ZONA I			
Rango de pendiente	área de influencia	factor	
0 - 2 %	0,8	0,2	0,16
2% - 7%	12,74	0,1	1,274
> 7%	5,1	0,06	0,306
	18,64		1,74
Factor ponderado	Kp	0,093	

Tabla 2.2

Cálculo del Kp ponderado ZONA II			
Rango de pendiente	Area de influencia	factor	
0 - 2 %	5,78	0,2	1,156
2% - 7%	4,7	0,1	0,47
> 7%	4,02	0,06	0,2412
	14,5		1,8672
Factor ponderado	Kp	0,129	

Tabla 2.3

Cálculo del Kp ponderado ZONA III			
Rango de pendiente	Area de influencia	factor	
0 - 2 %	0,95	0,2	0,19
2% - 7%	1,45	0,1	0,145
> 7%	1,52	0,06	0,0912
	3,92		0,4262
Factor ponderado	Kp	0,109	

Tabla 2.4

Cálculo del Kp ponderado ZONA IV			
Rango de pendiente	Area de influencia	factor	
0 - 2 %	0,75	0,2	0,15
2% - 7%	0,94	0,1	0,094
> 7%	1,91	0,06	0,1146
	3,6		0,3586
Factor ponderado	Kp	0,100	

a.2) Cálculo de factor de uso de suelo (Kv)

Para el cálculo del factor de usos de suelos se utilizó la categorización y cuatificación áreal realizada y expresada en el mapa IV y se correlacionaron con los factores establecidos por Junker y Shosinsky 2000 en la tabla 3

Tabla 3

Uso de la tierra	Kv
Café	0,19
Bosques	0,2
Caña y Granos básicos	0,1
Áreas urbanas e industriales*	0,05

Junker M, 2005; Shosinsky 2000

*extrapolación de valor en base a propuesta de valor 0.10 para zonas suburbanas

Posteriormente para cada una de las cuatro zonas establecidas se llevó a cabo el cálculo del coeficiente de usos de suelos ponderado (Kv), expresado en las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

Tabla 3.1

Descripción de uso de suelo	Cálculo del Factor Kv ponderado ZONA I		
	Zona I	factor Kv	
	18,64		
Bosques	1,72	0,2	0,344
Café	16,04	0,19	3,0476
Granos Básicos, caña y cultivos	0	0,1	0
Áreas Suburbanas	0,88	0,1	0,088
Áreas Urbanas e Industriales	0	0,05	0
	18,64		3,4796
	Cv	0,19	

Tabla 3.2

Cálculo del Factor Kv ponderado ZONA II			
Descripción de uso de suelo	Zona II	factor Kv	
	14,5		
Bosques	0,35	0,2	0,07
Café	4,8	0,19	0,912
Granos Básicos, caña y cultivos	7,1	0,1	0,71
Areas Suburbanas	0,27	0,1	0,027
Areas Urbanas e Industriales	1,98	0,05	0,099
	14,5		1,818
	Cv	0,13	

Tabla 3.3

Cálculo del Factor Kv ponderado ZONA III			
Descripción de uso de suelo	Zona III	factor Kv	
	3,92		
Bosques	0	0,2	0
Café	1,67	0,19	0,3173
Granos Básicos, caña y cultivos	1,65	0,1	0,165
Areas Suburbanas	0,2	0,1	0,02
Areas Urbanas e Industriales	0,4	0,05	0,02
	3,92		0,5223
	Cv	0,13	

Tabla 3.4

Cálculo del Factor Kv ponderado ZONA IV			
Descripción de uso de suelo	Zona IV	factor Cv	
	3,6		
Bosques	0,72	0,2	0,144
Café	0	0,19	0
Granos Básicos, caña y cultivos	1,36	0,1	0,136
Areas Suburbanas	0,55	0,1	0,055
Areas Urbanas e Industriales	0,97	0,05	0,0485
	3,6		0,3835
	Cv	0,11	

a.3) Cálculo de factor de textura del suelo (Kfc)

Para el cálculo del factor por textura del suelo Kfc se llevó a cabo una caracterización de las texturas de suelo existentes en función del tipo de suelo (primordialmente Andisoles y en menor medida Latosoles árcillosos rojizos) en la zona de estudio. Posteriormente un aspecto primordial es la asociación y caracterización del rango de permeabilidad o vel de infiltración (cm/h) o (mm/día) propio de cada tipo de suelo en base a su textura. Para ello, un resumen de la propiedades físicas del suelo en función de su textura se presenta en la tabla 4 (Valverde, J., *Riego y Drenaje*, 2000).

Tabla 4

Tabla 12
RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

TEXTURA	VELOC. INFIL. cm/h	POROSIDAD %	P. ESP. APARENT gr/cm ³	CAPAC. CAMPO MARCH. %	PERMA. %	HUM. UTILIZ cm/m
Arenos.	5 (2-25)	38 (32-42)	1,65 (1,5-1,8)	9 (6-12)	4 (2-6)	8 (7-10)
Franco arenos.	2,5 (1,3-7,6)	43 (40-47)	1,50 (1,4-1,6)	14 (10-18)	6 (4-8)	12 (9-15)
Franco	1,3 (0,8-2,0)	47 (43-49)	1,40 (1,3-1,5)	22 (18-26)	10 (8-12)	17 (14-19)
Franco arcill.	0,8 (0,2-1,5)	49 (47-51)	1,35 (1,3-1,4)	27 (23-31)	13 (11-15)	19 (17-22)
Arcill. arenos.	0,25 (0,03-0,5)	51 (49-53)	1,30 (1,2-1,3)	31 (27-35)	15 (13-17)	23 (18-23)
Arcill.	0,05 (0,01-0,1)	53 (51-55)	1,25 (1,2-1,3)	35 (31-39)	17 (15-19)	23 (20-25)

FUENTE: Grassi, C. *Métodos de Riego*. 1976.

En la tabla 5 se presenta la caracterización de la permeabilidad para cada tipo de suelo y para cada una de las cuatro zonas establecidas.

Tabla 5

Caracterización de la textura del suelo asociado a las formaciones geológicas en la cuenca del río San Antonio									
Formación Geológica	Tipo de suelo	Textura del suelo	Permeabilidad Característica K (cms/h) / (mm/día)	Area de formación Geológica	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Area de la cuenca
área de la cuenca				40,66	18,64	14,5	3,92	3,6	40,66
S ₂ (lavas basáltico andesíticas)	Andisoles	Suelos Francos - Franco Limosos con alto contenido orgánico en la zona media y alta de la cuenca	(0.833 cm/h) (200 mm/d)	14,80	14,8	0	0	0	14,8
S ₄ (piroclásticas ácidas)	Andisoles desarrollados	Franco Limosos desarrollados, intemperizados y consolidados con bajo contenido orgánico principalmente en la zona baja de la cuenca	(0.625 cm/h) (150 mm/d)	19,10	3,4	13,9	1,5	0,3	19,1
S _{3a} (Tobas)	Andisoles con Transición a Latosoles	Franco arcillosos	(0.375 cm/h) (90 mm/d)	3,46	0,44	0,6	2,42	0	3,46
b ₁ y b ₃ Piroclásticas y Epiclásticas localmente efusivas; Efusivas básicas intermedias	Latosoles arcillosos rojizos	Suelos Arcillosos - arenosos	(0.15 cm/h) (35 mm/d)	1,90	0	0	0	1,9	1,9
Qf Depósitos aluviales	Suelos aluviales	Suelos areno-limosos	(0.625 cm/h) (150 mm/d)	1,4	0	0	0	1,4	1,4

En las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se presenta el cálculo del "fc" ponderado para cada una de las cuatro zonas establecidas.

Tabla 5.1

Cálculo de fc ponderado ZONA I				
Geología de la cuenca	Tipo de suelo en la cuenca	Distribución de áreas Km ²	fc Permeabilidad K (mm/día)	
S ₂ (lavas basáltico andesíticas)	Andisoles	14,8	200	2960
S ₄ (piroclásticas ácidas)	Andisoles desarrollados	3,4	150	510
S _{3a} (Tobas)	Andisoles con Transición a Latosoles	0,44	90	39,6
b ₁ y b ₃ Piroclásticas y Epiclásticas localmente efusivas; Efusivas básicas intermedias	Qf Latosoles arcillosos rojizos	0	35	0
Qf Depósitos aluviales	Suelos aluviales	0	150	0
Area total		18,64		3509,6
fc ponderado		fc	188,28	

Tabla 5.2

Cálculo de fc ponderado ZONA II				
Geología de la cuenca	Tipo de suelo en la cuenca	Distribución de áreas Km ²	fc Permeabilidad K (mm/día)	
S ₂ (lavas basáltico andesíticas)	Andisoles	0	200	0
S ₄ (piroclásticas ácidas)	Andisoles desarrollados	13,9	150	2085
S _{3a} (Tobas)	Andisoles con Transición a Latosoles	0,6	90	54
b ₁ y b ₃ Piroclásticas y Epiclásticas localmente efusivas; Efusivas básicas intermedias	Qf Latosoles arcillosos rojizos	0	35	0
Qf Depósitos aluviales	Suelos aluviales	0	150	0
Area total		14,5		2139
fc ponderado		fc	147,52	

Tabla 5.3

Cálculo de fc ponderado ZONA III				
Geología de la cuenca	Tipo de suelo en la cuenca	Distribución de áreas Km ²	fc Permeabilidad K (mm/día)	
S ₂ (lavas basáltico andesíticas)	Andisoles	0	200	0
S ₄ (piroclásticas ácidas)	Andisoles desarrollados	1,5	150	225
S _{3a} (Tobas)	Andisoles con Transición a Latosoles	2,42	90	217,8
b ₁ y b ₃ Piroclásticas y Epiclásticas localmente efusivas; Efusivas básicas intermedias	Latosoles arcillosos rojizos	0	35	0
Qf Depósitos aluviales	Suelos aluviales	0	150	0
Area total		3,92		442,8
fc ponderado		fc	112,96	

Tabla 5.4

Cálculo de fc ponderado ZONA IV				
Geología de la cuenca	Tipo de suelo en la cuenca	Distribución de áreas Km ²	fc Permeabilidad K (mm/día)	
S ₂ (lavas basáltico andesíticas)	Andisoles	0	200	0
S ₄ (piroclásticas ácidas)	Andisoles desarrollados	0,3	150	45
S _{3a} (Tobas)	Andisoles con Transición a Latosoles	0	90	0
b ₁ y b ₃ Piroclásticas y Epiclásticas localmente efusivas; Efusivas básicas intermedias	Latosoles arcillosos rojizos	1,9	35	66,5
Qf Depósitos aluviales	Suelos aluviales	1,4	150	210
Area total		3,6		321,5
		fc	89,31	

En las tablas 6 y 7 se presentan los valores propuestos de K_{fc} por Junker 2005 y los valores propuestos en la aplicación de la metodología. Tomando en cuenta dichos cuadros y haciendo una correlación podría estimarse que valores en el rango de 0.20 - 0.50 serían los valores estimados y correspondientes al tipo de suelo franco - franco limoso existente en la zona de recarga hídrica donde aflora la formación geológica S₂

Tabla 6

Por textura del suelo	K _{fc}
Suelos arcillosos, latosoles de altura, zonas urbanas, suelos compactos e impermeables	0.10
Suelos de combinación de limo y arcilla. Litosoles y Regosoles de valles	0.15
Suelos arenosos recientes, suelos de cauces de ríos y suelos no muy compactos	0.20

Junker 2005. Aplicación del Método RAS a las condiciones de El Salvador

Tabla 7

Por textura del suelo	K _{fc}
Suelos arcillosos, compactos e impermeables	0.10
Suelos de combinación de limo y arcilla.	0.20
Suelos limo arenosos no muy compactos	0.40

Valores propuestos en la metodología Shosinsky 2000.

En la tabla 8 se presenta los valores de porcentaje en peso de suelo seco del punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC), así como la densidad del suelo; asociadas a la textura del suelo, que se proponen en el método Shosinsky 2000. Dichos parámetros tal como se ha señalado, son requeridos para el cálculo de la humedad inicial en el desarrollo metodológico. Por otra parte en la tabla 9 se presenta los valores de la profundidad de las raíces en función del tipo de cultivo o cobertura arbórea, los cuales son esenciales en la determinación de la humedad y la evapotranspiración real.

Tabla 8

Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos (Grassi, 1976).

TEXTURA DEL SUELO	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP%	CC%	Densidad aparente (g/cm ³)
Arenoso	2-6	6-12	1,55-1,80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1,40-1,60
Franco	8-12	18-26	1,35-1,50
Franco- arcilloso	11-15	23-31	1,30-1,40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1,25-1,35
Arcilloso	15-19	31-39	1,20-1,30

Shosinsky 2000

Tabla 9

Profundidad de raíces de diferentes cultivos (Grassi, 1976).

PROFUNDIDAD DE RAÍCES	
Cultivo	Metros
Alfalfa (pastos)	1-2
Algodón	1-1,7
Banano	0,5-0,8
Caña de azúcar	1,20-2
Frijol	0,5-0,7
Cebolla	0,3-0,5
Cárnicos	1,20-2,0
Zacate	0,3-0,5
Bosques	2,0-3,0

Shosinsky 2000

b) Cálculo de la Precipitación media (mm) y la Evapotranspiración potencial media (mm).

b.1) precipitación media (mm)

El cálculo de la precipitación media se llevó a cabo para zona alta y la zona baja de la cuenca del río San Antonio. Para ello se utilizaron los registros de lluvia media mensual de seis estaciones meteorológicas, tal como se presenta en las tablas 10 y 11. A partir de ello se llevó el análisis de Isoyetas y se determinó la serie correspondiente de la lluvia para la zona alta y la zona baja de la cuenca, tal como se presenta en la tabla 12.

Tabla 10

CUENCA DEL RIO SAN ANTONIO								
Estaciones Meteorológicas consideradas para el cálculo de la Precipitación media mensual en la zona de estudio P (mm)								
INDICE	NOMBRE DE ESTACION	CATEGORIA	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	ELEVACION (mts.)	AÑO DE FUNDACION	CUENCA-SUBCUENCA	Periodo de Registros
S-10	Aeropuerto de Ilopango	CP3 S-N-A	487200	286409	615	1953	Jiboa-Lago Ilopango	1953 - 2012
S-3	Apopa, FENADESAL	P	481980	298765	420	1928	Lempa - Acelhuate	1928 - 1983
S-13	Nejapa Beneficio San Jerónimo	P	474773	299693	450	1956	Lempa - Acelhuate	1956 - 1982
S-17	Apopa - Insinca	Ppg	480537	297292	420	1955	Lempa - Acelhuate	1973 - 2008
L-24	El Jabalí	P	467018	294171	1080	1967	Lempa - Sucio	1969 - 1979
L-18	El Boquerón	CO3	469536	290480	1800	1965	Lempa - Acelhuate	1969 - 1992

Tabla 11

Precipitaciones medias mensuales P (mm) para cada estación considerada en el cálculo de Isoyetas														
INDICE	Nombre de estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
S-10	Aeropuerto de Ilopango	3,0	2,0	9,6	41,4	165,9	275,9	326,3	315,8	338,8	231,7	45,0	9,2	1764,7
S-3	Apopa, FENADESAL	4,8	4,0	9,1	55,3	196,8	328,6	342,4	335,2	351,5	229,3	35,4	8,3	1900,9
S-13	Nejapa Beneficio San Jerónimo	1,8	3,2	11,4	63,7	172,2	282,2	330,9	335,0	350,1	202,7	31,3	3,9	1788,3
S-17	Apopa - Insinca	2,6	3,0	11,4	47,6	160,1	266,5	291,8	309,2	294,7	180,3	35,9	9,0	1612,1
L-24	El Jabalí	4,5	0,0	17,0	64,3	155,0	266,4	283,5	343,4	292,6	214,4	41,3	10,8	1693,0
L-18	El Boquerón	4,5	3,1	13,5	52,4	179,3	389,0	387,8	387,0	424,0	240,2	39,0	13,5	2133,5

Tabla 12

Precipitaciones determinadas para la zona alta y la zona baja de la Cuenca del río San Antonio mediante Isoyetas P (mm)													
Area de Influencia	Enero	Febrero	Marzo	abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Parte alta	4,3	2,1	13,0	60,0	174,0	332,0	354,0	380,0	365,0	218,0	35,0	11,0	1948,4
Parte baja	4,0	1,6	16,0	62,0	161,0	293,0	285,0	334,0	326,0	190,0	36,0	5,0	1713,6

b.2) Evapotranspiración potencial (mm)

En la tabla 13 se presentan las estaciones utilizadas y las series de Epot media mensual calculada para cada una de las estaciones utilizadas y posteriormente incorporadas al análisis de la evapotranspiración potencial mediante Isolíneas de evapotranspiración potencial.

Tabla 13

Evapotranspiración Potencial Media mensual (Epot) (mm) en Estaciones meteorológicas de análisis																
INDICE	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	ELEVACION (mts.)	Ene	Feb	Mar	abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TOTAL
S-10	487200	286409	615	134,6	126,5	127,7	136,2	139,7	169,9	170,0	162,0	145,8	154,3	151,9	134,8	1753
L-04	456031	298612	460	132,5	122,1	121,1	127,5	131,8	161,3	164,1	158,2	144,1	155,3	151,7	134,0	1704
L-08	468809	285134	965	127,1	118,2	115,6	122,1	125,5	150,3	152,0	144,6	137,4	152,0	147,2	128,5	1621
L-18	469536	290480	1800	87,0	92,0	114,0	114,0	111,0	96,0	109,0	108,0	93,0	93,0	81,0	81,0	1179

En la tabla 14 se presenta el cálculo de las series de evapotranspiración potencial para la parte alta-media y la parte baja de cuenca. El mismo se llevó a cabo mediante el análisis de isolíneas de evapotranspiración.

Tabla 14

Evapotranspiración potencial Media para la parte media-alta y baja de la cuenca del Río San Antonio obtenidas mediante Isolíneas de Espot (mm)													
Area de Influencia	Ene	Feb	Mar	abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TOTAL
Parte media alta	102,0	102,0	117,0	121,0	119,0	120,0	126,0	124,0	107,0	109,0	100,0	96,0	1343
Parte baja	107,0	106,0	120,0	123,0	123,0	127,0	134,0	132,0	114,0	118,0	111,0	104,0	1419

c) Cálculo de la Recarga hídrica al acuífero de Nejapa mediante la aplicación del Método Shosinsky 2000 a través de hoja electrónica Excel, para cada una de las cuatro zonas establecidas.

Una vez calculados los factores de infiltración K_p , K_v , y K_{fc} para cada zona; así como las series de lluvia y evapotranspiración característica para la zona media-alta y la zona baja, se procede al análisis de la recarga hídrica potencial para cada zona establecida.

En los cuadros II, III, IV y V se presenta el análisis para cada una de las cuatro zonas establecidas. Se puede observar la recarga hídrica potencial R_p (mm) anual calculada para cada zona. Para la zona I $R_p = 591.23$ mm ; zona II $R_p = 378.17$ mm; zona III $R_p = 259.31$ mm; y $R_p = 159.63$ mm.

Cuadro II

BALANCE HIDRICO DE SUELOS
Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: ZONA I

Fecha:

Textura de Suelo: Formación Geológica principal S2 - S4 Suelo franco Andisoles

Simbología

- | | |
|--|-------------------------------------|
| fc: Capacidad de Infiltración. | P: Precipitación Media Mensual. |
| I: Infiltración. | Pi: Precipitación que infiltra. |
| CC: Capacidad de Campo. | ESC: Escorrentía Superficial |
| PM: Punto de Marchitez. | ETP: Evapotranspiración Potencial. |
| PR: Profundidad de Raíces. | ETR: Evapotranspiración Real. |
| (CC-PM): Rango de Agua Disponible. | HSi: Humedad de Suelo Inicial. |
| DS: Densidad de Suelo. | HD: Humedad Disponible |
| C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR | HSf: Humedad de Suelo Final. |
| C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR | DCC: Déficit de Capacidad de Campo. |
| Kp: Factor por pendiente (ver léame) | Rp: Recarga Potencial |
| Kv: Factor por vegetación (ver léame) | NR: Necesidad de Riego. |
| Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración | Ret: Retención de lluvia |

fc [mm/d]	188,30		
Kp [0.01%]	0,09		
Kv [0.01%]	0,19		
Kfc [0.01%]	0,64656	por peso	
I [0.01%]	0,92956	(%)	(mm)
DS (g/cm ³):	1,40	CC	26,00 364,00
PR (mm)	1000,00	PM	12,00 168,00
HSi (mm)	364,00	(CC-PM)	14,00 196,00
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10		
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,17		

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	4,30	2,10	13,00	60,00	174,00	332,00	354,00	380,00	365,00	218,00	35,00	11,00	1948,40
Ret [mm]	4,30	2,10	5,00	10,20	29,58	56,44	60,18	64,60	62,05	37,06	5,95	5,00	342,46
Pi (mm)	0,00	0,00	7,44	46,29	134,25	256,15	273,12	293,18	281,61	168,19	27,00	5,58	1492,81
ESC (mm)	0,00	0,00	0,56	3,51	10,17	19,41	20,70	22,22	21,34	12,75	2,05	0,42	113,13
ETP (mm)	102,00	102,00	117,00	121,00	119,00	120,00	126,00	124,00	107,00	109,00	100,00	96,00	1343,00
HSi (mm)	260,76	225,05	203,08	192,71	208,70	268,97	364,00	364,00	364,00	364,00	364,00	364,00	309,63
C1	0,47	0,29	0,22	0,36	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,75
C2	0,23	0,14	0,09	0,14	0,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63	0,38	0,38
HD (mm)	92,76	57,05	42,52	71,01	174,95	357,12	469,12	489,18	477,61	364,19	223,00	147,20	901,58
ETR (mm)	35,71	21,96	17,81	30,30	73,97	120,00	126,00	124,00	107,00	109,00	81,38	54,44	260,76
HSf (mm)	225,05	203,08	192,71	208,70	268,97	364,00	364,00	364,00	364,00	364,00	309,63	260,76	309,63
DCC (mm)	138,95	160,92	171,29	155,30	95,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54,37	103,24	103,24
Rp (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,12	147,12	169,18	174,61	59,19	0,00	0,00	591,23
NR (mm)	205,24	240,95	270,48	245,99	140,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	73,00	144,80	1320,51

Cuadro III

BALANCE HIDRICO DE SUELOS
Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: ZONA II PARTE BAJA

Fecha:

Textura de Suelo: SUELOS FRANCO LIMOSOS ANDISOLAS DESARROLLADOS E INTEMPERIZADOS

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raíces.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infiltra.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSF: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Rt: Retención de Lluvia

fc [mm/d]	147.52
Kp [0.01%]	0.13
Kv [0.01%]	0.13
Kfc [0.01%]	0.58767
I [0.01%]	0.84667
DS (g/cm ³):	1.40
PR (mm)	750.00
HSi (mm)	273.00
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	26.00	273,00
PM	13.00	136,50
(CC-PM)	13,00	136,50

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	4,00	1,60	16,00	62,00	161,00	293,00	285,00	334,00	326,00	190,00	36,00	5,00	1713,60
Ret (mm)	4,00	1,60	5,00	7,44	19,32	35,16	34,20	40,08	39,12	22,80	5,00	5,00	218,72
Pi (mm)	0,00	0,00	9,31	46,19	119,96	218,31	212,34	248,85	242,89	141,56	26,25	0,00	1265,67
ESC (mm)	0,00	0,00	1,69	8,37	21,72	39,53	38,46	45,07	43,99	25,64	4,75	0,00	229,21
ETP (mm)	107,00	106,00	120,00	123,00	123,00	127,00	134,00	132,00	114,00	118,00	111,00	104,00	1419,00
HSi (mm)	182,05	160,34	149,01	147,57	165,41	212,21	273,00	273,00	273,00	273,00	273,00	222,71	
C1	0,33	0,17	0,16	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63	
C2	0,07	0,04	0,02	0,04	0,19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,38	0,15	
HD (mm)	45,55	23,84	21,83	57,27	148,87	294,02	348,84	385,35	379,39	278,06	162,75	86,21	
ETR (mm)	21,71	11,32	10,75	28,35	73,16	127,00	134,00	132,00	114,00	118,00	76,54	40,66	887,50
HSF (mm)	160,34	149,01	147,57	165,41	212,21	273,00	273,00	273,00	273,00	273,00	222,71	182,05	
DCC (mm)	112,66	123,99	125,43	107,59	60,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,29	90,95	
Rp (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,52	78,34	116,85	128,89	23,56	0,00	0,00	378,17
NR (mm)	197,95	218,66	234,67	202,23	110,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	84,75	154,29	1203,20

Cuadro IV

BALANCE HIDRICO DE SUELOS
Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: ZONA III PARTE BAJA DE LA CUENCA

Fecha:

Textura de Suelo: SUELOS ANDISOLES CON TRANSICION A LATOSILES FRANCO ARCILLOSOS

Simbología

- fc: Capacidad de Infiltración.
- I: Infiltración.
- CC: Capacidad de Campo.
- PM: Punto de Marchitez.
- PR: Profundidad de Raíces.
- (CC-PM): Rango de Agua Disponible.
- DS: Densidad de Suelo.
- C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
- C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
- Kp: Factor por pendiente (ver léame)
- Kv: Factor por vegetación (ver léame)
- Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración
- P: Precipitación Media Mensual.
- Pi: Precipitación que infiltra.
- ESC: Escorrentía Superficial
- ETP: Evapotranspiración Potencial.
- ETR: Evapotranspiración Real.
- HSi: Humedad de Suelo Inicial.
- HD: Humedad Disponible
- HSf: Humedad de Suelo Final.
- DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
- Rp: Recarga Potencial
- NR: Necesidad de Riego.
- Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	113,00	
Kp [0.01%]	0,11	
Kv [0.01%]	0,13	
Kfc [0.01%]	0,52181	
I [0.01%]	0,76181	
DS (g/cm ³):	1,38	
PR (mm)	750,00	
HSi (mm)	279,45	
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10	
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,12	
		por peso (%) (mm)
		CC 27,00 279,45
		PM 13,00 134,55
		(CC-PM) 14,00 144,90

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	4,00	1,60	16,00	62,00	161,00	293,00	285,00	334,00	326,00	190,00	36,00	5,00	1713,60
Ret [mm]	4,00	1,60	5,00	7,44	19,32	35,16	34,20	40,08	39,12	22,80	5,00	5,00	218,72
Pi (mm)	0,00	0,00	8,38	41,56	107,93	196,43	191,06	223,91	218,55	127,37	23,62	0,00	1138,82
ESC (mm)	0,00	0,00	2,62	13,00	33,75	61,41	59,74	70,01	68,33	39,83	7,38	0,00	356,06
ETP (mm)	107,00	106,00	120,00	123,00	123,00	127,00	134,00	132,00	114,00	118,00	111,00	104,00	1419,00
HSi (mm)	183,67	160,79	148,62	146,10	161,72	203,64	275,86	279,45	279,45	279,45	279,45	225,54	
C1	0,34	0,18	0,15	0,37	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63	
C2	0,09	0,05	0,03	0,06	0,14	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,18	
HD (mm)	49,12	26,24	22,44	53,12	135,10	265,52	332,38	368,81	363,45	272,27	168,52	90,99	
ETR (mm)	22,88	12,17	10,89	25,95	66,01	124,20	134,00	132,00	114,00	118,00	77,53	41,87	879,50
HSf (mm)	160,79	148,62	146,10	161,72	203,64	275,86	279,45	279,45	279,45	279,45	225,54	183,67	
DCC (mm)	118,66	130,83	133,35	117,73	75,81	3,59	0,00	0,00	0,00	0,00	53,91	95,78	
Rp (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	53,48	91,91	104,55	9,37	0,00	0,00	259,31
NR (mm)	202,78	224,66	242,46	214,78	132,80	6,38	0,00	0,00	0,00	0,00	87,38	157,91	1269,16

Cuadro V

BALANCE HIDRICO DE SUELOS
Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: ZONA IV

Fecha:

Textura de Suelo: SUELOS LATOSOLES ARCILLOS Y SUELOS ALUVIALES

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]

89.31

Kp [0.01%]

0.10

Kv [0.01%]

0.11

Kfc [0.01%]

0.46264

I [0.01%]

0.67264

DS (g/cm³):

1.36

PR (mm)

750.00

HSi (mm)

275.40

Nº de mes con que inicia HSi:1,2,3...12?

10

Lluvia retenida [0.01%]: Bosques=0.2, otros=0.12

0.12

por peso

(%)

(mm)

CC 27.00 275.40

PM 13.00 132.60

(CC-PM) 14.00 142.80

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	4.00	1.60	16.00	62.00	161.00	293.00	285.00	334.00	326.00	190.00	36.00	5.00	1713.60
Ret [mm]	4.00	1.60	5.00	7.44	19.32	35.16	34.20	40.08	39.12	22.80	5.00	5.00	218.72
Pi (mm)	0.00	0.00	7.40	36.70	95.30	173.43	168.70	197.70	192.97	112.47	20.85	0.00	1005.52
ESC (mm)	0.00	0.00	3.60	17.86	46.38	84.41	82.10	96.22	93.91	54.73	10.15	0.00	489.36
ETP (mm)	107.00	106.00	120.00	123.00	123.00	127.00	134.00	132.00	114.00	118.00	111.00	104.00	1419.00
HSi (mm)	178.61	157.05	145.64	143.08	156.64	193.42	255.66	275.40	275.40	275.40	272.15	218.30	
C1	0.32	0.17	0.14	0.33	0.84	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.60	
C2	0.08	0.04	0.02	0.05	0.12	0.75	1.00	1.00	1.00	0.96	0.35	0.16	
HD (mm)	46.01	24.45	20.44	47.18	119.34	234.25	291.76	340.50	335.77	255.27	160.40	85.70	
ETR (mm)	21.56	11.41	9.96	23.14	58.52	111.19	134.00	132.00	114.00	115.71	74.70	39.69	845.89
HSf (mm)	157.05	145.64	143.08	156.64	193.42	255.66	275.40	275.40	275.40	272.15	218.30	178.61	
DCC (mm)	118.35	129.76	132.32	118.76	81.98	19.74	0.00	0.00	0.00	3.25	57.10	96.79	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.96	65.70	78.97	0.00	0.00	0.00	159.63
NR (mm)	203.79	224.35	242.36	218.62	146.46	35.55	0.00	0.00	0.00	5.53	93.40	161.10	1331.15

Los valores resultantes se obtienen en la tabla 14

Tabla 14

Recarga Acuífera Calculada				
Zona	Formación geológica predominante	Recarga acuífera por zona (mm)	Area por zona Km ²	Volumen Millones de Mt ³
I	S ₂	591,23	18,64	11,02
II	S ₄	378,17	14,5	5,48
III	S _{3a} y S ₄	259,31	3,92	1,02
IV	b ₁ y b ₃	159,63	3,6	0,57
Area de la cuenca			40,66	
Volumen de recarga hídrica al acuífero (Millones Mt ³)				18,10
Recarga ponderada (mm)				445,08

En la misma puede observarse un volumen de recarga de 18.10 Millones de mt³ y una recarga ponderada para toda la cuenca de 445.08 mm anuales.

En la tabla 15 se observa el cálculo y los valores resultantes en el EIA-ILC.

Puede observarse un volumen de aportación al acuífero de 21.79 millones de mt³ y una recarga hídrica ponderada para toda la cuenca de 741.97 mm

Tabla 15

Recarga calculada en el EIA- ILC				
Zona	formación geologica	Recarga acuífera por zona (mm)	Area por zona Km ²	Volumen Millones de Mt ³
I	S ₄	1077,9	15,49	16,70
II	S _{3a}	330,56	9,48	3,13
III	S ₂	445,72	4,4	1,96
Total			29,37	21,79
Recarga ponderada (mm)			741,97	

Esta diferencia se debe fundamentalmente a una sobrevaloración de factor de textura de suelo f_c , estimado en $f_c=1400$ mm/día (5.83 cm/hora), el cual es una permeabilidad propia de un suelo arenoso tal como se observa en la tabla IV. El incorporar este factor genera otro problema en el análisis, referente a que dado que se estima una absorción total del escurrimiento en la zona media - alta de análisis, el escurrimiento generado en todos los meses del año es "0", lo cual contraviene el comportamiento hidrológico natural en la zona de estudio; donde se puede observar diversos escurrimientos menores en los cauces de las quebradas próximas a las comunidades de El Salitre y se evidencia las huellas del alto escurrimiento y arrastre sedimentario en los cauces de los drenajes naturales, después de lluvias de baja y moderada magnitud.

Por otra parte, en el análisis no se ha elaborado un análisis de Isoyetas e Isolíneas para el cálculo de la lluvia promedio y la evapotranspiración potencial para la parte media - alta y baja, sino que únicamente se ha asignado a la parte media alta los valores de precipitación y evapotranspiración de la estación boquerón, lo cual consigna altos valores de lluvia anual de 2135 mm y una baja Evap de 787.58 mm. Esto introduce una nueva sobrevaloración en el cálculo final de la recarga hídrica (1077.90 mm), ya que no toma en cuenta la climatología real, tal como se establece en el apartado II, para una zona de análisis que posee elevaciones entre los 550 msnm y los 1900 msnm. En ese sentido es fundamental llevar a cabo un análisis de lluvia mediante la aplicación de Isoyetas e Isopiezas para el cálculo de la Evapt.

En el cuadro VI se presenta el cálculo llevado a cabo por el EIA-ILC, en el que se pueden observar todos los aspectos señalados.

Por último puede observarse en el mismo, que el valor de K_{fc} obtenido es de 0.99561, lo cual es totalmente alejado de los rangos de referencia planteados en las tablas 6 y 7; en las cuales se establece un valor de referencia y representativo de 0.40 para este tipo de suelos.

Cuadro VI

Balance hídrico para la zona I elaborado por EIA-ILC

BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
Zona de Estudio:		ZONA I											
Fecha:													
Textura de Suelo:													
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración.							P: Precipitación Media Mensual.						
I: Infiltración.							Pi: Precipitación que infiltra.						
CC: Capacidad de Campo.							ESC: Escorrentía Superficial						
PM: Punto de Marchitez.							ETP: Evapotranspiración Potencial.						
PR: Profundidad de Raíces.							ETR: Evapotranspiración Real.						
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.							HSi: Humedad de Suelo Inicial.						
DS: Densidad de Suelo.							HD: Humedad Disponible						
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final.						
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo.						
Kp: Factor por pendiente (ver léame)							Rp: Recarga Potencial						
Kv: Factor por vegetación (ver léame)							NR: Necesidad de Riego.						
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de lluvia						
fc [mm/d]		1400.00											
Kp [0.01%]		0.06											
Kv [0.01%]		0.19											
Kfc [0.01%]		0.99561						por peso					
I [0.01%]		1						CC		25.00		277.50	
DS (g/cm³):		1.48						PM		13.06		144.97	
PR (mm)		750.00						(CC-PM)		11.94		132.53	
HSi (mm)		277.50											
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?		10											
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1		0.12											
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	5.00	3.00	14.00	45.00	178.00	374.00	399.00	383.00	431.00	244.00	42.00	17.00	2135.00
Ret [mm]	5.00	3.00	5.00	5.40	21.36	44.88	47.88	45.96	51.72	29.28	5.04	5.00	269.52
Pi (mm)	0.00	0.00	9.00	39.60	156.64	329.12	351.12	337.04	379.28	214.72	36.96	12.00	1865.48
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	87.00	92.00	114.00	114.00	111.00	96.00	109.00	108.00	93.00	93.00	81.00	81.00	1179.00
HSi (mm)	210.56	181.63	165.01	159.77	172.70	243.12	277.50	277.50	277.50	277.50	277.50	246.92	
C1	0.49	0.28	0.22	0.41	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.86	
C2	0.17	0.08	0.03	0.06	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.67	0.33	
HD (mm)	65.59	36.67	29.05	54.41	184.38	427.27	483.65	469.57	511.81	347.25	169.49	113.95	
ETR (mm)	28.92	16.62	14.24	26.67	86.23	96.00	109.00	108.00	93.00	93.00	67.54	48.36	787.58
HSf (mm)	181.63	165.01	159.77	172.70	243.12	277.50	277.50	277.50	277.50	246.92	210.56		
DCC (mm)	95.87	112.49	117.73	104.80	34.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.58	66.94	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	198.74	242.12	229.04	286.28	121.72	0.00	0.00	1077.90
NR (mm)	153.94	187.87	217.49	192.13	59.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.04	99.58	954.20

IV.3 Desarrollo del Balance Hídrico mediante aplicación de Coeficientes de Precipitación - Ecurrimiento (PE) implementados en el Balance Hídrico Dinámico de El Salvador (SNET-2005).

Una segunda metodología de análisis aplicada para el cálculo del Balance Hídrico es la basada en factores de precipitación escurrimiento (P-E), determinados para todas las cuencas en el país, en el marco del Balance hídrico Dinámico de El Salvador, SNET - 2005. Los mismos fueron determinados a partir de la relación entre los caudales medidos en las estaciones hidrométricas y convertidos a escurrimiento areal (mm), y la lluvia registrada en las estaciones meteorológicas (mm) para la misma cuenca de estudio. Estos factores se refieren a flujos medidos en las estaciones por lo que es importante ponderarlos por un factor de corrección cuando existan extracciones previas a las estaciones (como el caso de riego), o bien, vertientes que se adicionan, (como el caso de flujos provenientes de aguas residuales en cuencas urbanas), y que en ambos casos modifican los caudales naturales. La recarga acuífera obtenida mediante la aplicación de dicha metodología se presenta en la tabla 16.

Tabla 16

Recarga Calculada Revision EIA MÉTODO P-E			
Zona	Recarga acuífera por zona (mm)	Area por zona Km ²	Volumen Millones de Mt ³
I	557,8	18,64	10,40
II	397,4	14,5	5,76
III	397,4	3,92	1,56
IV	397,4	3,6	1,43
Area de la cuenca		40,66	19,15
Recarga ponderada (mm)			470,93

En dicha tabla puede observarse que la recarga para la zona alta es 557.8 mm y para la zona media baja es de 397,4 mm, obteniéndose una recarga ponderada de 470.93 mm y un volumen de recarga de 19.15 Mmt³.

En el anexo A se presenta el desarrollo del método P-E y del balance hídrico tanto para la zona alta, como para la zona media-baja.

IV.4 Valoración comparativa desde otros estudios desarrollados.

IV.4.1 Gil, L., "Evaluación Hidrogeológica y Vulnerabilidad Intrínseca del Sistema Acuífero del Municipio de Nejapa, San Salvador, El Salvador". Investigación de Tesis de post-grado- Universidad de Costa Rica 2007.

En la tabla 17 se presenta el análisis de la zonificación de recarga desarrollada en el trabajo de investigación (Gil, L. 2007)

Tabla 17
Determinación de la Recarga Hídrica Acuífero de Nejapa (Gil, L. 2007)

Zonificación del área de estudio	formación geológica predominante	Recarga acuífera por zona de estudio (mm)	Area (mt2)	Volumen de Recarga (mt3)
I	s4	745,74	3348087,23	2496802,571
II	s4	322,69	32327721,14	10431832,33
III	s2	739,33	14386659,19	10636488,74
IV	c1	337,63		0
V	c3	321,7		0
VI	c1	337,85		0
VII	c3	234,94		0
VIII	s3a	235,51	3402425,92	801305,3284
IX	s3a	152,95	439694,6	67251,28907
X	b1	0		0
XI	s4	0		0
XII	b1	0		0
XIII	s3a	388,31	33383,44	12963,12359
			53937971,52	24446643,39
Area de la cuenca trazada y volumen de recarga (Km2) y (millones de Mt3)			53,94	24,45
Recarga Ponderada de la cuenca (mm)				453,24

En la misma puede observarse que no se ha integrado en el análisis, las áreas correspondientes a las formaciones geológicas c1 y c3, ya que las mismas no afloran en la cuenca de estudio. Por otra parte, las formaciones b1 y s4 ubicadas en las estribaciones del cerro de Nejapa y en la parte norte del municipio han sido definidas con recarga "0", es decir, se ha determinado que no contribuyen con ningún aporte a la recarga del acuífero. El área definida como cuenca de estudio es de 53.94 km² y el volumen es de 24.45 Mmt³. En general, la recarga ponderada para toda la cuenca es de 453.24 mm lo cual es correspondiente a las condiciones hidrofísicas y meteorológicas de la cuenca de estudio.

IV.4.2 Ponce de León y otros., "Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamientos de los recursos hidrogeológicos en el municipio de Nejapa". Geólogos del Mundo, 2003.

La determinación de la recarga, establecida en el estudio llevado a cabo por Ponce, D. GDM-2003, se presenta en la tabla 18.

Tabla 18

Determinación de la Recarga Hídrica acuífero de Nejapa (Ponce, D. y otros GDM- 2003)			
Recarga por zona			
Zonificación	de estudio	Area	Volumen
I	144,64	21260000	3075046,4
II	251,14	19400000	4872116
III	302,67	1440000	435844,8
Area y Volumen (mt2 y mt3)		42100000	8383007,2
Area y Volumen (Kmt2 y Mm3)		42,10	8,38
Recarga Hídrica (mm)			199,12

En la misma puede observarse una recarga hídrica ponderada de 199.12 mm para la zonificación establecida. Esta baja recarga obtenida se debió a la consideración de índices de infiltración muy bajos en zona 1 (zona del volcán), provenientes de estudios realizados por ANDA-PNUD 72. Dichos índices probablemente no correspondían a las texturas de suelos asociados a las formaciones geológicas de lavas cuaternarias que se encuentran en el lugar y su determinación fue subestimada.

IV.4.3 Junker, M. "Zonificación y mapa de la recarga acuífera", Aplicación del Método RAS" FORGAES, 2007.

De acuerdo a la zonificación y mapa de recarga acuífera elaborado mediante la aplicación del método de Recarga de Agua Subterránea (RAS) *Junker, M (2006)*; la recarga característica de las zonas altas y estribaciones del volcán de San Salvador se encuentra en el orden de 500 - 600 mm, siendo en ese rango donde se encuentra la recarga hídrica de la parte alta del acuífero de Nejapa.

El mapa de zonificación y las "*tablas de zona*", las cuales se elaboraron para la zonificación de todo el territorio nacional, establecen los valores indicadores de los parámetros K_v , K_p y K_{fc} . Los mismos fueron determinados tomando en cuenta los aspectos hidrofísicos, tales como pendientes, usos del suelo, texturas del suelo y formaciones geológicas, y se integraron al análisis para la determinación de la recarga hídrica. Dicha recarga hídrica fue determinada para cada zona mediante la aplicación de la información de Isoyetas de lluvia e isolíneas de evapotranspiración, y otra información hidrometeorológica derivada del Balance Hídrico Dinámico de El Salvador, elaborado por el SNET - MARN 2005.

IV.4.4 SNET-MARN "Balance Hídrico Dinámico de El Salvador, 2005.

A partir del *Balance Hídrico Dinámico de El Salvador, SNET-2005*, se llevó a cabo el balance hídrico de la cuenca hidrográfica del río Acelhuate y se determinó su zona de recarga en las zonas ubicadas en las estribaciones y partes altas del volcán de San Salvador, las cuales constituyen el ámbito hidrográfico que recarga los acuíferos de San Salvador y Nejapa. El cambio de Almacenamiento en la cuenca del río Acelhuate se determinó en 319.13 mm, lo cual es coherente con el abordaje de una cuenca cuyas zonas medias-altas se encuentran bajo presión urbanística y paulatinamente van perdiendo capacidad de recarga. Si embargo, también se llevó a cabo el Balance hídrico para la cuenca o fosa particular del Boquerón obteniéndose una recarga hídrica de 533.14 mm.

V. EVALUACION DE LAS EXTRACCIONES Y DEMANDA HIDRICA EN LA ZONA.

En la tabla 19 se presenta el inventario de pozos perforados ubicados dentro de la zona de estudio. El mismo representa la información recopilada del EIA-ILC, la cual ha sido contrastada con la información presentada en los estudios de Ponce, D. 2003, y Gil, L. 2007; pudiéndose verificar que se trata básicamente de la misma información integrada, con la adición de algunos otros, en el estudio EIA-ILC. Esto es importante porque la información proveniente de los pozos, principalmente en lo que respecta a los niveles estáticos, corresponden en la mayoría de los casos, a los medidos en el momento del inicio de operaciones de pozo, es decir, al periodo comprendido entre la década de los años 70's y 90's; ya que, tal como se afirma en los estudios antecedentes, existieron limitantes para la determinación de los niveles estáticos debido a que los pozos se encontraban siempre en funcionamiento.

Se presenta adicionalmente, los volúmenes considerados por los pozos "dentro" en el EIA-ILC los cuales hacen un total de 9.67 millones de m^3 . La totalidad de pozos que debería integrarse en el análisis, tal como se ha señalado anteriormente constituyen un volumen total de explotación con información disponible de 28.71 millones m^3 . Este cálculo se ha efectuado en base a los mismos valores de caudales presentados en el EIA-ILC y bajo una operación de 24 horas, lo cual constituye en primera instancia parte de la capacidad instalada de extracción en el acuífero de Nejapa.

Por otra parte, el mismo estudio hidrogeológico de EIA-ILC establece que existen una cantidad importante de aprovechamientos que no han sido reportados a ANDA, es decir, no se tiene disponibilidad de sus datos, tal como se puede apreciar en los espacios vacíos para muchos pozos de la columna de caudales. A partir de ello, el EIA-ILC hace un estimado de extracción, el cual, conjuntamente con los pequeños aprovechamientos domésticos de la población (22 l/s), se determina en un volumen total de 15.63 millones de m^3 . Es decir, un volumen no reportado a ANDA pero que existe de 5.96 millones de m^3 .

Sin embargo, existen una gran cantidad de pozos que han sido dejados "fuera", pero que al integrarlos, tal como se ha indicado anteriormente, se alcanza un volumen de 28.71 Mm^3 , sin considerar los 5.96 Mm^3 que no ha sido reportado a ANDA. Ello supone una capacidad instalada de explotación de 34.67 Mm^3 , lo cual significa que el acuífero bajo estas condiciones de extracción se encuentra

actualmente sobre explotado. Si la recarga determinada es de 18.10 Mmt³ el acuífero estaría presentando un déficit anual de 16.57 Mmt³.

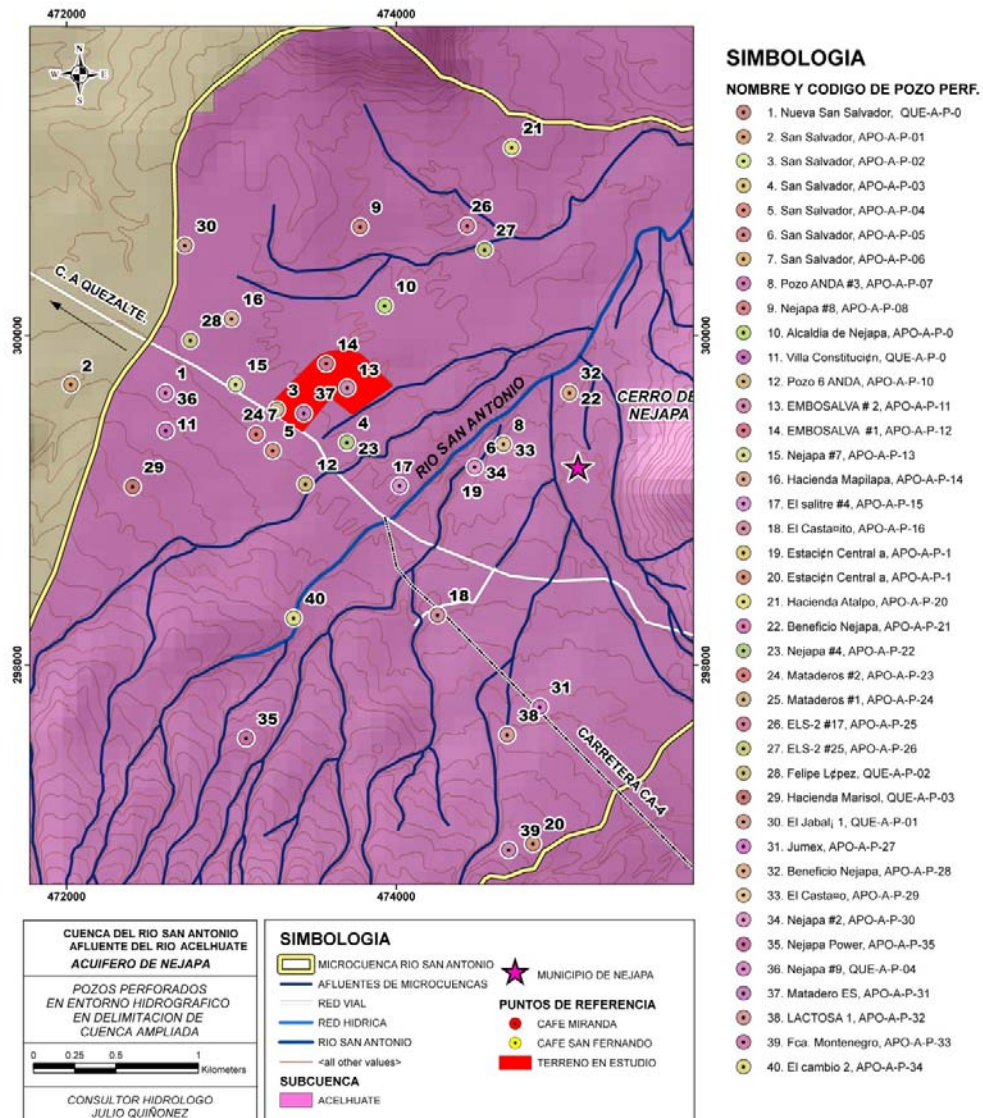
Tabla 19

No. en mapa	Código	Código	Coordenadas X	Coordenadas Y	Prof. (mt)	Elevación (msnm)	Nestático (m)	Nivel Piezom (msnm)	Q	Ubicación considerada en el EIA-ILC	Volumen extraído en pozos considerados "Dentro" por EIA ILC (millones Mt ³)	Volumen extraído en pozos con caudales determinados en 24 horas de operación (Millones de (Mmt ³))
1	Nueva San Salvador	QUE-A-P-05	472600	299650		490,00	24,38	465,62	25,00	Fuera		0,788
2	San Salvador	APO-A-P-01	472025	299700		465,00	24,38	440,62	20,00	Fuera		0,631
3	San Salvador	APO-A-P-02	473275	299550		510,00	24,38	485,62	12,62	Dentro	0,398	0,398
4	San Salvador	APO-A-P-03	473700	299350		520,00	24,38	495,62	15,00	Dentro	0,473	0,473
5	San Salvador	APO-A-P-04	473250	299300		480,00	56,39	423,61		Dentro	0,000	0,000
6	San Salvador	APO-A-P-05	474475	299200		450,00	48,3	401,7	30,00	Dentro	0,946	0,946
7	San Salvador	APO-A-P-06	473150	299400		510,00	16,9			Dentro	0,000	0,000
8	Pozo ANDA #3	APO-A-P-07	474645	299338	131,00							0,000
9	Nejapa #8	APO-A-P-08	473780	300660	106,00	456,00	55,32	400,68	72,00	Fuera		2,271
10	Alcaldía de Nejapa	APO-A-P-09	473929	300179	150,00					Fuera		0,000
11	Villa Constitución	QUE-A-P-06	472602	299421	186,00					Fuera		0,000
12	Pozo 6 ANDA	APO-A-P-10	473449	299095	80,00					Dentro	0,000	0,000
13	EMBOSALVA # 2	APO-A-P-11	473703	299681	76,22	463,00	25,91	437,09	9,45	Dentro	0,298	0,298
14	EMBOSALVA #1	APO-A-P-12	473575	299827	182,70	465,00	31,04	433,96	37,80	Dentro	1,192	1,192
15	Nejapa #7	APO-A-P-13	473025	299700	252,40	465,00	24,38	440,62	85,17	Fuera		2,686
16	Hacienda Mapilapa	APO-A-P-14	473000	300100	252,00	465,00	25,4	439,6	85,17	Fuera		2,686
17	El salitre #4	APO-A-P-15	474020	299085	91,00	438,88	27,2	411,68		Dentro	0,000	0,000
18	El Castaño 1 (El Castañito) Cantón Conacaste	APO-A-P-16	474250	298300	131,10	480,00	48,3	431,7		Dentro	0,000	0,000
19	Estación Central al #2	APO-A-P-18	474475	299200	232,00	549,00	134	415	65,61	Dentro	2,069	2,069
20	Estación Central al #1	APO-A-P-19	474829	299613	213,00	549,00	139	410	65,61	Fuera		2,069
21	Hacienda Atalpo	APO-A-P-20	474700	301140	147,56	440,00	53	387	3,15	Fuera		0,099
22	Beneficio Nejapa	APO-A-P-21	475050	299650	79,00	435,00	1,6	433,4	27,70	Fuera		0,874
23	Nejapa #4 (La granja) Cantón El Salitre	APO-A-P-22	473700	299350	91,44	520,00	56,39	463,61	15,00	Dentro	0,473	0,473
24	Mataderos #2	APO-A-P-23	473150	299400	76,20	510,00	28,5	481,5	6,31	Dentro	0,199	0,199
25	Mataderos #1	APO-A-P-24	473275	299550	78,64	510,00	24,38	485,62		Dentro	0,000	0,000
26	ELS-2 #17	APO-A-P-25	474430	300665	125,00	433,00	7,51	425,49		Fuera		0,000
27	ELS-2 #25	APO-A-P-26	474535	300520	90,00	433,00	2,54	430,46		Fuera		0,000
28	Felipe López	QUE-A-P-02	472750	299970	40	473,00	33,00	440,00		Fuera		0,000
29	Hacienda Marisol	QUE-A-P-03	472400	299080		533,00	85,62	447,38		Fuera		0,000
30	El Jabalí 1	QUE-A-P-01	472717	300547	164,63	465,00	60,75	404,25	9,15	Fuera		0,289
31	Jumex	APO-A-P-27	474870	297742					15,00	Dentro	0,473	0,473
32	Beneficio Nejapa	APO-A-P-28	475050	299650	79,0	430,41	1,60	428,81	27,70	Fuera		0,874
33	El Castaño (1975)	APO-A-P-29	474650	299340	50,00	443,69	17,70	425,99		Dentro	0,000	0,000
34	Hda. El Castaño 2 - Nejapa #2	APO-A-P-30	474475	299200	109,70	442,72	16,90	428,82	65,61	Dentro	2,069	2,069
35	Nejapa Power	APO-A-P-35	473089	297553	198,78	551,70	67,00	484,70	12,99	Dentro	0,410	0,410
36	Nejapa #9	QUE-A-P-04	472600	299650	204,20	476,36	24,38	451,98	85,17	Fuera		2,686
37	Matadero ES	APO-A-P-31	473439	299526	79,00	458,98	29,00	429,98	18,93	Dentro	0,597	0,597
38	LACTOSA 1	APO-A-P-32	474672	297573	167,68	513,14	83,84	429,3	2,21	Dentro	0,070	0,070
39	Fca. Montenegro	APO-A-P-33	474682	296874	140,00	560,28	86,00	462,28		Fuera		0,000
40	El cambio 2	APO-A-P-34	473377	298282	204,30	491,69	25,00	466,69		Dentro	0,000	0,000
	Otros pozos no incluidos que pertenecen a la cuenca de estudio											0,000
	Ingenio San Esteban		475134	300861	125,00	430	4,30	425				0,000
	Hda. Mapilapa no. 1		475452	301242	143,00		25,60					0,000
	Nejapa # 8 (2)		473873	300801	293,00	451,6	23,88	427,2				0,000
	El Coyolito		473923	300207			72,00					0,000
	2 de mayo		476948	304085	40,00		8,00					0,000
	Castaño 1 captación								98			3,091

9,67	28,71
5,96	5,96
15,63	34,67

En el mapa X se presenta la ubicación de los pozos indicados en la tabla 19 y en la cuenca de estudio.

Mapa X



VI. DISPONIBILIDAD HIDRICA EN PROYECCION FUTURA DEL ACUIFERO DE NEJAPA

VI.1 Análisis de la disminución de la línea de Saturación en proyección futura bajo condiciones de sobre explotación.

El déficit estimado puede correlacionarse con una disminución progresiva de la línea de saturación o nivel estático medido en el acuífero. En los estudios antecedentes realizados, tal como se ha indicado anteriormente, una de las dificultades encontradas fue la medición in-situ de los niveles estáticos debido a la continua operación de los pozos; por lo que su determinación se realizó en correlación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y la información histórica de los niveles estáticos, que provenía mayoritariamente, desde los tiempos en que fue iniciada la operación de los mismos.

Uno de los problemas que pueden encontrarse es la prospección geoelectrica de la franja capilar, en confusión con la franja saturada. Sabemos que la franja capilar se encuentra por encima de la franja saturada y aunque guarda cierto nivel de saturación, el mismo se refiere a la combinación de la retención específica (una pequeña membrana de humedad que se mantiene gracias a la fuerza de atracción entre las moléculas de agua y las moléculas de la formación geológica) y al Rendimiento específico (S_y), que es el volumen de agua que puede ser desplazado o drenado cuando existe un descenso unitario en una sección unitaria del acuífero. Es decir, se trata de una franja que se encuentra por encima del acuífero y no indica propiamente la línea de saturación, pero constituye lo que se conoce como el almacenamiento del acuífero y puede drenar importantes volúmenes de agua cuando el acuífero o línea de saturación empieza a descender o a disminuir su presión hidráulica cuando se trata de acuíferos confinados.

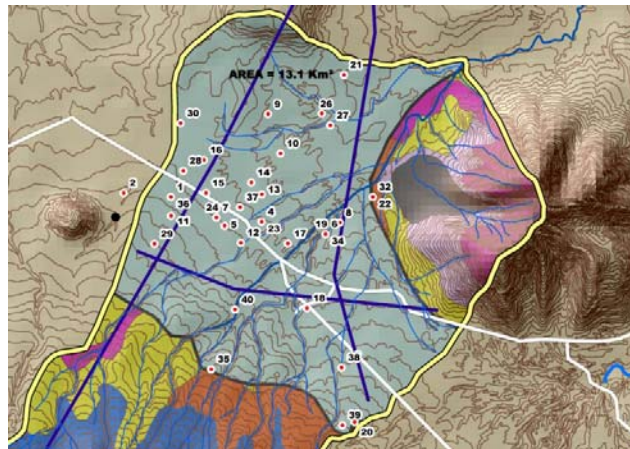
Sin embargo, una información importante para estimar los niveles estáticos actuales, medidos en la época lluviosa, la provee la prueba de bombeo efectuada en Julio del 2012 en el mismo pozo No.2 de la planta Nixapa. En el cuadro VII puede observarse que el nivel estático se encuentra a 75.69 mts (389 msnm) de la superficie (465msnm) y produce un caudal permanente de 32.2 lts/seg. Este nivel estático difiere significativamente de los niveles estáticos encontrados cuando se iniciaron operaciones en 1995-98, el cual se encontraba a 31.04 mts (434 msnm) y con un caudal de 37.80 lts/seg, tal como lo establece el mismo pozo Embosalva 1, correspondiente al numeral 14 de la tabla 19. Es decir, ha habido un descenso de 44.65 mts. en 19 años, correspondiente a una tasa de 2.35 mts/año.

Cuadro VII

Prueba de Bombeo a Caudal Constante											
Pozo de Bombeo:		Nixapa N° 2				Nivel Estático:		75.69 m			
Diámetro:		12 3/4"				Caudal:		33.2 l/s			
Inicio:		20/07/2012		12:20 p.m.							
Finalización:		21/07/2012		12:20 p.m.							
Duración de la Prueba:		24 h									
	Tiempo (min)	N. Dinámico (m)	Abat. (m)		Tiempo (min)	N. Dinámico (m)	Abat. (m)		Tiempo (min)	N. Dinámico (m)	Abat. (m)
	0				150	121.87	46.18	12 horas	720	125.97	50.28
	1				160	122.45	46.76		740	125.97	50.28
	2	101.80			170	122.66	46.97		760	125.99	50.30
	3	105.97		3 horas	180	122.90	47.21	13 horas	780	126.06	50.37
	4	107.35			190	123.10	47.41		810	126.00	50.31
	5	108.43	32.74		200	123.38	47.69	14 horas	840	126.05	50.36
	6	109.28			210	123.76	48.07		870	126.05	50.36
	7	110.00			220	122.91	47.22	15 horas	900	126.05	50.36
	8				230	123.02	47.33		930	126.07	50.38
	9	111.50		4 horas	240	123.18	47.49	16 horas	960	126.09	50.40
	10	112.00	36.31		260	123.50	47.81	17 horas	1020	126.15	50.46
	11	112.45			280	123.66	47.97	18 horas	1080	126.36	50.67
	12	112.75		5 horas	300	123.93	48.24	19 horas	1140	126.37	50.68
	13	113.00			320	124.10	48.41	20 horas	1200	126.40	50.71
	14	113.44			340	124.36	48.67	21 horas	1260	126.38	50.69
	15	113.67	37.98	6 horas	360	124.45	48.76	22 horas	1320	126.45	50.76
	20	114.84	39.15		380	124.65	48.96	23 horas	1380	126.45	50.76
	25	115.82	40.13		400	124.80	49.11	24 horas	1440	126.63	50.94
30 min	30	116.55	40.86	7 horas	420	124.95	49.26				
	35	117.00	41.31		440	125.10	49.41				
	40	117.51	41.82		460	125.32	49.63				
	45	117.96	42.27	8 horas	480	125.50	49.81				
	50	118.30	42.61		500	125.66	49.97				
	55	118.70	43.01		520	125.79	50.10				
1 hora	60	119.01	43.32	9 horas	540	125.89	50.20				
	70	119.60	43.91		560	125.95	50.26				
	80	120.00	44.31		580	125.95	50.26				
	90	120.43	44.74	10 horas	600	125.97	50.28				
	100	120.88	45.19		620	125.97	50.28				
	110	121.24	45.55		640	125.99	50.30				
2 horas	120	121.50	45.81	11 horas	660	126.00	50.31				
	130	121.85	46.16		680	125.89	50.20				
	140	121.92	46.23		700	125.92	50.23				

De acuerdo a los límites establecidos del acuífero profundo conformado primordialmente por lavas fracturadas; el mismo posee un área estimada de 13.10 Km², correspondiente a la parte baja aprovechable como acuífero semiconfinado. La delimitación espacial se presenta en el siguiente mapa XI.

Mapa XI
Delimitación espacial del acuífero semi confinado



Tomando en cuenta las secciones de los sondeos eléctricos verticales realizados en el año 2007 y el nivel de línea saturada, inferida a partir de los mismos, se pueden obtener dos secciones de aprovechamiento acuífero con un área de 92,846 Km² en la sección A-A, y una distancia de 3021 mts; y de 200,518.20 Km² en la sección B-B, y una distancia de 3975 mts. A partir de dichas dimensiones se obtiene un espesor promedio de 41 mts. Con ello se puede estimar una reserva acuífera de 537.1 millones de mt³.

En la figura IV se presenta la sección A-A la cual se ha prolongado hacia el sur en dirección al volcán de San Salvador. Tomando en cuenta la interpretación de los SEV/ANDA-1972, llevada a cabo en el marco del estudio de *Ponce de León, D. 2003-GDM*, la formación del basamento constituido por material limo arcilloso consolidado, empieza a ascender en dirección Suroeste. En la figura V se presenta la sección B-B, representando esa misma tendencia del basamento b1.

Figura IV
Sección A-A

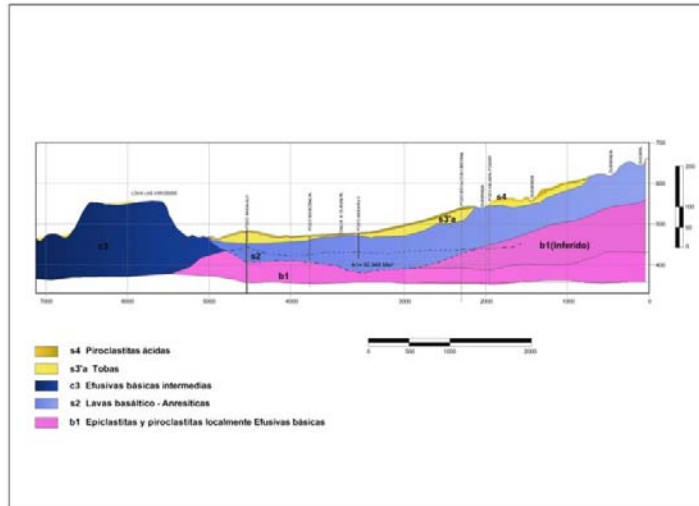
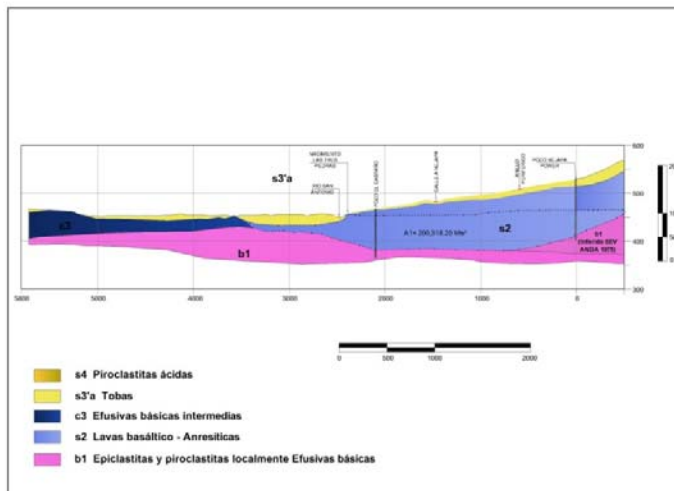


Figura V
Sección B-B



En la tabla 20 se presenta la proyección estimada para el agotamiento del acuífero hacia el año 2045 para las actuales condiciones en las que se estaría presentando un déficit de (16.57 Mmt3), con una recarga de 18.10 Mmt3 y extracción de 34.67 Mmt3.

Tabla 20

PROYECCION DE NIVEL DE AGOTAMIENTO DEL ACUIFERO ASUMIENDO CONSTANTE LA DEMANDA	
Espesor promedio del acuífero (mts)	41
volum del acuífero aprox:	537100000
volum en millones de mt3	537,1
vol por ml (millones de mt3/ml)	13,1
Recarga anual (millones de mt3)	18,1
Extracción anual (mill de mt3)	34,67
déficit anual aprox (Mmt3)	16,57
disminución anual (ml)	1,26
proyección para su agotamiento (años)	32,41

VI.2 Análisis de la disminución de la línea de Saturación en proyección futura bajo condiciones de sobre explotación y cambio climático.

El análisis para la determinación de la reducción en la recarga acuífera por efecto del cambio climático, se ha llevado a cabo tomando en cuenta el escenario de emisiones A2 y las diferentes proyecciones para los países Centroamericanos en cuanto a incremento de la Temperatura, disminución de la Precipitación media anual y disminución de la cobertura boscosa que se estableció en el estudio de CEPAL "Economía del cambio climático, síntesis 2010. Cepal", y cuya aplicación se presenta en el anexo B.

En la misma se ha determinado entre el periodo 2013 - 2045 una reducción de lluvia promedio de 11.24% en relación a los promedios actuales, un incremento del 4.8% de la evapotranspiración potencial como efecto de un incremento de 2°C en la temperatura hacia el año 2050, y una disminución de un 33% de la cobertura arbórea existente actualmente.

Los parámetros afectados por el cambio climático en el balance hídrico y sus respectivos promedios del periodo considerado se presentan en la tabla 21

Tabla 21

PARAMETROS AFECTADOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO			
	2013	2045	promedio del período
Reducción de Precipitación (mm) (-11.24%)	1948,4	1729,4	1839
Incremento de Incremento Evapotranspiración potencial (mm) (+4.80%)	1343	1407	1375
Reducción de cobertura arbórea (%) (-33%)	95	62	79

Los parámetros determinados se han aplicado nuevamente en el balance hídrico por el método de Shosinsky. A partir de los nuevos parámetros se ha determinado la recarga resultante para la zona I, que es la principal área de consideración, en 470.09 mm. El volumen de recarga es de 15.84 Mmt³, tal como se expresa en la tabla 22.

Tabla 22

Recarga Calculada con Cambio Climático			
Zona	Recarga acuífera por zona (mm)	Area por zona Km ²	Volumen Millones de Mt ³
I	470,09	18,64	8,76
II	378,17	14,5	5,48
III	259,81	3,92	1,02
IV	159,63	3,6	0,57
Area de la cuenca		40,66	15,84
Recarga ponderada (mm)			389,55

En la tabla 23 se presenta la aplicación de la proyección en cuanto a reducción de la recarga por cambio climático, estimándose el año 2041, como la fecha en que el acuífero de Nejapa podría llegar a agotarse.

Tabla 23

PROYECCION DE NIVEL DE AGOTAMIENTO DEL ACUIFERO CON CAMBIO CLIMÁTICO ASUMIENDO CONSTANTE LA DEMANDA	
Espesor promedio del acuífero (mts)	41
volum del acuífero aprox:	537100000
volum en millones de mt3	537,1
vol por ml (millones de mt3/ml)	13,1
Recarga anual (millones de mt3)	15,84
Extracción anual (mill de mt3)	34,67
déficit anual aprox (Mmt3)	18,83
disminución anual (ml)	1,44
proyección bruta para su agotamiento (años)	28,52

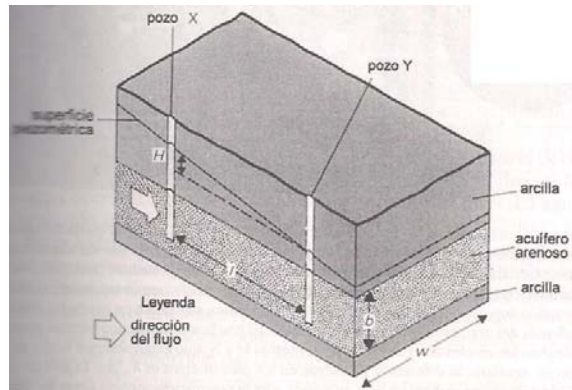
VI.3 Análisis de la demanda y su disminución como proyección futura.

En los análisis precedentes para valorar la tasa de disminución del acuífero y su proyección de agotamiento, se estimó que la demanda o volumen de extracción anual, de acuerdo a la capacidad instalada en el acuífero de Nejapa, se mantendría constante. Sin embargo, esta magnitud de extracción, podría también verse afectada y empezar a disminuir significativamente en los próximos años.

Esto se deduce porque una disminución en la línea de saturación, significa consecuentemente una reducción en el espesor del acuífero y por consiguiente una disminución en la Transmisividad (T) (m^2/dia).

La ley de Darcy, que define el comportamiento de los flujos en medios porosos, se define como $Q=K*A*H/l=K*b*w*H/l$, y de acuerdo a la representación del siguiente esquema:

Esquema de flujo (Q) en la ley de Darcy



Se tiene:

K (mts/seg) = conductividad hidráulica

b (mts) = espesor del acuífero

w (mts) = ancho del acuífero

H (mts) = diferencia piezométrica entre dos puntos de observación

l (mts) = distancia entre dos puntos de observación.

La misma puede representarse como:

$$Q = T*w*(H/l)$$

Donde : Q = Caudal (mts/día)

T = Transmisividad ($mt^2/día$) = $K*b$ (la transmisividad es igual a la conductividad por el espesor del acuífero)

w = ancho considerado del acuífero o de la sección del flujo de agua (mt)

(H/l) = gradiente hidráulico (adimensional), que se define como la relación entre la diferencia de niveles y la distancia de dos puntos de observación o niveles piezométricos de las curvas isofreáticas.

Un ejemplo de una reducción en los flujos disponibles se presenta nuevamente en el mismo pozo Nixapa No.2. A partir de la prueba de bombeo a caudal constante realizada en Julio de 2012, se obtuvo una transmisividad de $T = 58.33 \text{ mt}^2/\text{dia}$ y un caudal de $Q = 33 \text{ lts/seg}$. Dichos valores difieren con los obtenidos en 1995-98, con $T = 73 \text{ mt}^2/\text{d}$ y $Q = 37.80 \text{ lts/seg}$, lo cual supondría que el espesor acuífero se ha reducido.

Por otra parte, una disminución significativa se presenta en las extracciones efectuadas por ANDA para el suministro de agua potable a la zona metropolitana de San Salvador. En la tabla 24 se puede observar una disminución de 2.1 Mmt^3 entre el 2010 y 2011, lo cual podría indicar, entre otras cosas, las dificultades de seguir aprovechando el acuífero con la misma capacidad instalada, primordialmente en cuanto a profundidades de los pozos.

Tabla 24

Disminución de las extracciones efectuadas por ANDA		
	2010	2011
Pozo 9	811.201	465.359
Pozo 8	739.096	555.158
Pozo 6	623.065	427.916
Pozo 2	2.281.733	1.592.586
Capt 1	2.974.248	2.286.220
volumen total (mt³)	7.429.343	5.327.239

VI.4 Evaluación de la disminución de los caudales base del río San Antonio.

Otro importante aspecto que debe analizarse, es la progresiva disminución de los caudales base del río San Antonio.

Aplicando la metodología de factores de P-E, indicada anteriormente, se obtuvieron los siguientes caudales promedios mensuales (lts/seg) que se indican en la tabla 24 al punto de control aguas abajo del nacimiento tres piedras.

Tabla 24

Caudales Determinados mediante P-E en el punto de control aguas abajo del nacimiento tres piedras Área de Recogimiento Hídrico de 33.8 Km ²												
Zona de Recogimiento	ene	feb	mar	abri	mayo	jun	jul	ago	sep	octu	nov	dic
parte alta	95,0	110,2	86,9	117,6	159,1	359,8	442,8	506,0	686,1	590,2	173,9	128,3
parte media baja	72,1	68,5	87,2	99,1	120,1	258,9	290,7	362,7	499,7	419,4	145,8	47,5
Caudales generados lts/seg	167,14	178,68	174,09	216,78	279,17	618,75	733,57	868,72	1185,76	1009,58	319,67	175,80

De acuerdo al programa de aforos realizados en el año 2007, para el mes de abril se obtuvo un caudal de 227,2 lts/seg, el cual se aproxima al determinado mediante el método P-E de 216.78 lts/seg. Sin embargo, aforos efectuados recientemente en el mes de Octubre de 2013 determinaron un caudal de 620 lts/seg, muy inferior al caudal promedio de 1009.58 lts/seg.

De acuerdo a lugareños y señoras lavanderas de avanzada edad que frecuentan el lugar de los nacimientos desde hace décadas, afirman que los mismos han disminuido su caudal en la época seca en un 60% en relación a los caudales para esa misma época en los años 70's.

En general, para las actuales condiciones en los nacimientos del río San Antonio, y tomando en cuenta un caudal base promedio anual de 175 lts/seg se tendría un volumen drenado anual de 5.5 Mmt³, el cual provendría en parte del acuífero profundo de lavas cuaternarias, pero fundamentalmente del acuífero somero.

Parece muy improbable que actualmente el río San Antonio se encuentre sustentado enteramente por el acuífero profundo, tal como se estimó en el año 2007. Pues tal como se ha indicado, la magnitud de las extracciones y la disminución de la línea de saturación, impediría que sea el acuífero profundo el principal contribuyente de los caudales base del río. El nivel estático en el pozo Nixapa No. 2 se encuentra a 390 msnm y el afloramiento de la formación S₂ del nacimiento se encuentra a próxima a los 420 msnm. En ese sentido, una parte mayoritaria podría provenir del acuífero Somero y el resto vendría del acuífero profundo, pero no ya de su zona de saturación, sino principalmente de su zona capilar como volumen descargado de su

almacenamiento (S); que es precisamente la situación que se presenta en acuíferos que están siendo sobre explotados y presentan un descenso de su línea piezométrica.

VII. MEDIDAS DE IMPLEMENTACION Y COMPENSACIÓN PARA UN APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL ACUIFERO

Con la finalidad de propiciar un aprovechamiento sustentable que tienda a revertir el desequilibrio actual en la explotación del acuífero de Nejapa y su nivel de recarga, se proponen las siguientes medidas de implementación y compensación.

- A. Llevar a cabo una declaratoria por parte del MARN, de una zona de protección y preservación hidroecológica en las estribaciones noreste del volcán de San Salvador, aproximadamente entre las elevaciones 550 msnm y las zonas altas del Boquerón, donde se alcanzan elevaciones próximas a los 1900 msnm. Es decir, propiciar la máxima protección, prioritariamente en la zona de la formación geológica San Salvador S₂.
- B. Recategorizar la vocación de uso de suelo en la franja de agrocultivos próxima y paralela a la carretera que conduce a Quezaltepeque, primordialmente entre 460 msnm y la 550 msnm, de tal forma de frenar el avance industrial y urbanístico que actualmente se lleva a cabo y que incide grandemente en acelerar el deterioro de los recursos hídricos de la zona, tal como era el enfoque inicial de la planificación territorial de los años 70 's.
- C. Iniciar una campaña de sensibilización y socialización de las condiciones actuales del acuífero de Nejapa, con el fin de propiciar su protección desde los diferentes sectores sociales y económicos.

VIII. CONCLUSIONES

1. Cálculo equivocado de la recarga hídrica del acuífero de Nejapa en el EIA-ILC

La recarga hídrica es una parte esencial del Balance Hídrico que condiciona la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero de Nejapa; de tal forma que su cálculo requiere llevarse a cabo, considerando en el análisis de sus parámetros (precipitación, evapotranspiración potencial, Coeficiente de infiltración, escurrimiento superficial, etc.), valores, datos y procesamiento de los mismos, lo más próximo a las condiciones hidrofísicas y climáticas de la zona de estudio. Este aspecto no ha sido tomado en cuenta rigurosamente en el EIA-ILC y por consiguiente se obtienen resultados alejados del comportamiento hidrológico de la cuenca, en el análisis del balance hídrico a través de la metodología de Shosinsky – Losilla (2000).

1.1) Para el cálculo del factor de infiltración en función de la textura del suelo (K_{fc}) se ha tomado un valor de permeabilidad $f_c = 1400$ mm/día, el cual corresponde a suelos arenosos y no a suelos francos y franco limosos, tal como es la textura de los suelos andisoles característicos de la zona de estudio. Los mismos suelen presentar permeabilidades en el orden de $f_c = 200 - 300$ mm/día. Esto genera un valor de coeficiente de Infiltración excesivamente alto ($I = 0.969$) que deriva en los resultados de un escurrimiento "0" para todos los meses del año, lo cual no corresponde a las condiciones hidrofísicas de la zona de estudio y a las condiciones naturales del ciclo hidrológico.

1.2) En el cálculo del balance hídrico se ha integrado para la zona I, la serie de precipitación y evapotranspiración potencial perteneciente a la estación meteorológica del Boquerón, como representativas de una región con grandes diferencias climáticas y elevaciones que oscilan entre los 600 msnm - 1900 msnm. Esta condición genera una nueva distorsión en el análisis del balance hídrico pues sobre estima los valores de precipitación y subestima los

valores de evapotranspiración potencial en la zona I. En este caso se tenía que haber desarrollado el trazo de isoyetas de precipitación e isolíneas de evapotranspiración potencial, tomando en cuenta la incidencia de otras estaciones meteorológicas representativas para toda la zona.

- 1.3) Consecuentemente se genera un cálculo de recarga hídrica excesivamente alto de 1077.90 mm en esa zona I, lo cual está totalmente alejado de la recarga característica de la zona I, tal como se ha destacado adicionalmente en el análisis de otros estudios. Esta estimación de la recarga origina en el EIA-ILC una disponibilidad sobre estimada de volumen en el acuífero calculada en 21.79 Mmt³, es decir, sobre estimada, de acuerdo a su área hidrográfica, en aproximadamente 4.0 Mmt³.

2. Trazo equívoco de la cuenca hidrográfica en el EIA-ILC, segmentando el acuífero de Nejapa y dejando fuera una parte esencial de la demanda.

- 2.1) El trazo de la cuenca en su parte baja, no integra la frontera natural del acuífero conformados esencialmente por la formación hidrogeológica de lavas fracturadas del cuaternario, de tal forma que deja fuera del análisis aproximadamente un 60% del acuífero donde se lleva a cabo una parte sustancial de las extracciones.
- 2.2) El no tomar en cuenta los límites naturales del acuífero, supone en el EIA-ILC no tomar en cuenta 19 Mmt³, que es correspondiente a un 54.8% de la capacidad instalada de extracción que existe actualmente en el acuífero.
- 2.3) En general, actualmente se tiene una capacidad instalada que propicia una extracción anual de 34.67 Mt³ y en el EIA-ILC únicamente se ha considerado 15.63 Mt³.

3. Disminución progresiva de la línea de Saturación y condición de sobre explotación en el acuífero de Nejapa.

- 3.1) Se ha podido estimar que actualmente existe una tasa de disminución anual de la línea de saturación de 1.26 ml/año la cual podría incrementarse por efecto de cambio climático a 1.44 ml/año.

- 3.2) De acuerdo a la prueba de bombeo realizada en el pozo Nixapa No.2 en Julio de 2012, el nivel estático o nivel de la línea de saturación ha disminuido 44.65 mts en relación a la obtenida a entre mediados y finales de la década de los 90 's.
- 3.3) El déficit actual se ha estimado en 16.57 Mmt³ tomando en cuenta una recarga de 18.10 Mmt³ y un volumen de extracción de 34.67 Mmt³.
- 3.4) Bajo estas condiciones, el acuífero podría estar llegando a su agotamiento en 32 años, es decir hacia el año 2045. Sin embargo, integrando los efectos del cambio climático, el mismo podría estar llegando a su agotamiento hacia el año 2042.

4. Dificultad progresiva para mantener en el tiempo las condiciones de explotación actual.

- 4.1) Dada la disminución paulatina que experimenta el acuífero, se experimentará cada vez con mayor énfasis, una dificultad en mantener la capacidad de extracción instalada, de tal forma que paulatinamente se irán disminuyendo los caudales de extracción. Este fenómeno podría atenuarse un poco si se llevara a cabo un incremento en las profundidades de los pozos de tal forma de tratar de aprovechar un espesor mayor del acuífero. Sin embargo, esta posibilidad se ve limitada ya que se estaría perforando el basamento del acuífero, donde las conductividades hidráulicas y por consiguiente las transmisividades son muy pequeñas, pues se trata de unidades geológicas compuestas por materiales limo-arcillosos compactos y bien consolidados, tal como se ha descrito en el estudio.
- 4.2) Ejemplo de ello, podría ser la disminución significativa que ha experimentado el suministro de agua por parte de ANDA hacia la zona metropolitana, desde su sistema instalado en el acuífero de Nejapa. El mismo se ha determinado a partir de sus boletines estadísticos entre el periodo 2010-2011, en una reducción de 2.1 Mmt³.

IX. RECOMENDACIONES.

1. A partir de los aspectos destacados en el presente estudio se hace necesario una revaloración completa del estudio de impacto ambiental presentado por ILC enfocado a incrementar su caudal de aprovechamiento; pues dado las condiciones actuales del acuífero, no es viable dicho incremento de dotación estimado en 30 lts/seg. Mas aún, debería de revisarse su explotación actual para integrarla y ajustarla a una perspectiva de planificación hídrica del territorio dentro de una dinámica racional de aprovechamiento sustentable y en atención primordial a las prioridades nacionales de abastecimiento a la población a mediano y largo plazo. Mas aun, tratándose de una fuente estratégica como es el acuífero de Nejapa.
2. Socializar entre todos los sectores interesados, la realidad hidrológica, y de disponibilidad y demanda hídrica en el acuífero de Nejapa. Esto con el fin de normar y controlar adecuadamente por parte del MARN y ANDA el régimen de extracciones y las horas diarias de operación de los pozos, con el fin de iniciar un proceso paulatino y encaminado a buscar un equilibrio sustentable del acuífero basado en una reducción de los volúmenes de extracción actual. Dichos volúmenes de extracción podrían encontrar su umbral límite en los 15 Mmt³.
3. La rehabilitación y construcción por parte de ANDA de los pozos piezométricos y de observación necesarios, para un eficaz monitoreo de las condiciones de explotación del acuífero y un control adecuado y actual de los niveles estáticos.
4. Bajo las actuales condiciones no es viable que ANDA pueda seguir otorgando autorizaciones de no objeción para la explotación del acuífero, pues las mismas se hacen sin ninguna base de sustentación.

ANEXO A

1. Metodología de Precipitación-Escorrentamiento (P-E)

La metodología de Precipitación – Escorrentamiento (P-E) consiste en la generación de caudales en base a las relaciones existentes a nivel mensual entre estas dos variables.

La precipitación tomada en la relación corresponde a la precipitación media areal mensual en la cuenca hidrográfica y la escorrentía (mm) corresponde a la resultante de multiplicar los factores, que relacionan ambas variables, por la lluvia establecida.

Para el cálculo de los factores, el SNET (Observatorio Ambiental – MARN) evaluó para todo el país, las regiones que presentan similar comportamiento hidrológico en cuanto a la relación lluvia – escorrentamiento a nivel mensual con base a los registros de las estaciones de lluvia y de caudal en las cuencas que poseen medición en las estaciones hidrométricas. A partir de dicha información se determinaron factores mensuales que relacionan estas dos variables, los cuales se presentan en la tabla A-1.

Tabla A-1
Factores PE para las 10 regiones a nivel nacional

Las zonas definidas para la aplicación de la relación Lluvia-Escorrentamiento se presentan en el mapa A. Esta zonificación se basa en 10 zonas características con

ZON	ENE.	FEB.	MAR.	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
1	3.91	5.86	1.11	0.41	0.15	0.19	0.23	0.24	0.31	0.49	0.69	2.06	0.30
2	2.20	5.26	0.58	0.17	0.08	0.12	0.15	0.25	0.34	0.37	0.42	1.51	0.27
3	2.20	6.25	0.65	0.18	0.08	0.11	0.15	0.22	0.30	0.46	0.45	1.79	0.26
4	2.92	2.47	0.28	0.09	0.10	0.20	0.22	0.18	0.36	0.50	0.51	1.09	0.29
5	1.86	1.20	0.12	0.05	0.11	0.32	0.23	0.30	0.45	0.57	0.64	0.75	0.35
6	1.11	1.15	0.18	0.06	0.07	0.20	0.30	0.28	0.42	0.63	0.65	1.23	0.31
7	1.52	2.96	0.51	0.12	0.07	0.18	0.18	0.19	0.32	0.35	0.37	1.08	0.25
8	1.33	1.05	0.29	0.10	0.08	0.24	0.28	0.27	0.32	0.42	0.47	0.90	0.28
9	4.30	9.02	1.41	0.40	0.17	0.17	0.20	0.21	0.28	0.42	0.83	2.43	0.31
10	1.52	2.96	0.51	0.12	0.07	0.18	0.18	0.19	0.32	0.35	0.37	1.08	0.25

similares condiciones fisiográficas, geológicas, tipos y usos de suelo, permitiendo así, el cálculo del escurrimiento superficial en aquellas subcuencas que no poseen estaciones hidrométricas o registro de caudales. Estas relaciones no dependen del área y pueden ser aplicadas a cuencas de cualquier tamaño.

Para llevar a cabo la determinación del escurrimiento medio mensual se multiplican los factores correspondientes a los meses y zona donde se ubica el territorio de interés por su respectiva precipitación media en mm, obteniéndose igualmente el escurrimiento en mm. Posteriormente se transforma a caudales medios (m³/seg), multiplicando el escurrimiento mensual encontrado por su respectiva área de recogimiento de la subcuenca en estudio y relacionándolo con unidades de tiempo, (segundos en un mes).

Mapa A

Zonificación de aplicación de los factores de
Precipitación – Escorrentía



Puede observarse que la zona de aplicación es la zona 9 ilustrada con coloración morado oscuro.

En las tablas A-2 y A-3 se presenta la determinación de los caudales medios mensuales (mm) y lts/seg, para la parte alta y media baja de la cuenca del río San Antonio, respectivamente.

Tabla A-2

Determinación de Caudales Medios por el método de Precipitación - Escorrentía
Cuenca hidrográfica del río San Antonio (Parte alta)

Nombre de la Subcuenca	Zona de aplicación de factores de Precipitación Escorrentía	Área de Recogimiento Hídrico (Ha-Km ²)	enero	feb	mar	abril	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic	anual
1. Cuenca del Río San Antonio (Parte alta Región 9)	9	1864													
		18,64													
Factores de relación Precipitación-Escorrentía para la cuenca del río San Antonio Zona 9			4,3	9,02	1,41	0,4	0,17	0,17	0,2	0,21	0,28	0,42	0,83	2,43	0,2510
Factor de corregido por retorno en cuenca del río acelhuate y sucio (por aguas residuales)			3,18	6,81	0,93	0,26	0,13	0,15	0,18	0,19	0,26	0,39	0,69	1,68	
Precipitación media mensual (mm) Interpolación de estaciones por Isoyetas			4,30	2,10	13,00	60,00	174,00	332,00	354,00	380,00	365,00	218,00	35,00	11,00	1948,40
Escorrentía (mm)			13,66	14,30	12,08	16,90	22,86	50,03	63,63	72,71	95,40	84,80	24,18	18,43	489,00
			0,10	0,11	0,09	0,12	0,16	0,36	0,44	0,51	0,69	0,59	0,17	0,13	0,2880
Caudal Medio (lts/seg)			95,04	110,21	86,89	117,65	159,11	359,81	442,84	506,03	686,08	590,15	173,85	128,26	287,99

Tabla A-3

Determinación de Caudales Medios por el método de Precipitación - Escorrentía
Cuenca hidrográfica del río San Antonio (Parte media - baja)

Nombre de la Subcuenca	Zona de aplicación de factores de Precipitación-Escorrentía	Área de Recogimiento Hídrico (Ha-Km ²)	enero	feb	mar	abril	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic	anual	
1. Cuenca del Río San Antonio (Parte alta Región 9)	9	2202														
		22,02														
Factores de relación Precipitación-Escorrentía para la cuenca del río San Antonio Zona 9			4,3	9,02	1,41	0,4	0,17	0,17	0,2	0,21	0,28	0,42	0,83	2,43	0,2502	
Factor de correjido por retorno en cuenca del río acehuate y sucio (por aguas residuales)			3,18	6,81	0,93	0,28	0,13	0,15	0,18	0,19	0,26	0,39	0,69	1,68		
Precipitación media mensual (mm) Interpolación de estaciones por Isoyetas			4,00	1,60	16,00	62,00	161,00	293,00	285,00	334,00	326,00	190,00	36,00	5,00	1713,60	
Escorrentía (mm)			12,70	10,90	14,87	17,47	21,15	44,16	51,23	63,91	85,21	73,91	24,87	8,38	428,75	
			0,10	0,10	0,13	0,14	0,17	0,38	0,42	0,53	0,72	0,61	0,21	0,07	0,2984	
Caudal Medio (lts/seg)			104,44	99,19	126,33	143,61	173,92	375,12	421,17	525,42	723,69	607,62	211,25	68,87	298,40	

2. Balance Hídrico

Se presenta en las tablas A-4 y A-5 el cálculo del balance hídrico, tanto para la parte alta como para la parte media y baja de la cuenca del río San Antonio. En el mismo se ha incorporado las series obtenidas inicialmente de precipitación y evapotranspiración potencial para cada zona de estudio. Por otra parte se ha incorporado la serie de escurrimiento superficial obtenido mediante la metodología de factores de Precipitación Escurrimiento PE.

Tabla A-4

BALANCE HIDRICO RIO SAN ANTONIO
CALCULO DEL ESCURRIMIENTO MEDIANTE FACTORES PRECIPITACION-ESCURRIMIENTO (PE) SNET 2005
ZONA ALTA

Area de Recogimiento Hídrico (Km²) 18,62

PARAMETRO DE ESTUDIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	anual (mm)	Volumen (mt3)	Distribución de la precipitación %
1. Precipitación anual (mm)	4,3	2,1	13,0	60,0	174,0	332,0	354,0	380,0	365,0	218,0	35,0	11,0	1948,4	36.279.208,00	100,00
2. Evapotranspiración real total															
2.1 Evapotranspiración real (mm)	35,7	22,0	17,8	30,3	74,0	120,0	126,0	124,0	107,0	109,0	81,4	54,4	901,6	16.787.445,58	46,27
3. Escorrentía media mensual superficial y subsuperficial (mm)	13,7	14,3	12,1	16,9	22,9	50,0	63,6	72,7	95,4	84,8	24,2	18,4	489,0	9.105.101,82	25,10
Caudales Medios Mensuales (lts/seg)	94,94	110,09	86,79	117,52	158,94	359,42	442,37	505,49	685,34	589,52	173,67	128,12			
4. Cambio de almacenamiento o Recarga al acuífero (mm)	-45,1	-34,2	-16,9	12,8	77,2	162,0	164,4	183,3	162,6	24,2	-70,6	-61,9	557,8	10.386.660,61	28,63

Tabla A-5

BALANCE HIDRICO RIO SAN ANTONIO
CALCULO DEL ESCURRIMIENTO MEDIANTE FACTORES PRECIPITACION-ESCURRIMIENTO (PE) SNET 2005
ZONA MEDIA BAJA

Area de Recogimiento Hídrico (Km²) 22,04

PARAMETRO DE ESTUDIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	anual (mm)	Volumen (mt3)	Distribución de la precipitación %
1. Precipitación anual (mm)	4,0	1,6	16,0	62,0	161,0	293,0	285,0	334,0	326,0	190,0	36,0	5,0	1713,6	37.767.744,00	100,00
2. Evapotranspiración real total															
2.1 Evapotranspiración real (mm)	21,7	11,3	10,8	28,4	73,2	127,0	134,0	132,0	114,0	118,0	76,5	40,7	887,5	19.560.421,80	51,79
3. Escorrentía media mensual superficial y subsuperficial (mm)	12,7	10,9	14,9	17,5	21,2	44,2	51,2	63,9	85,2	73,9	24,9	8,4	428,8	9.448.673,77	25,02
Caudales Medios Mensuales (lts/seg)	104,54	99,28	126,44	143,74	174,08	375,46	421,56	525,90	724,54	608,17	211,44	68,94			
4. Cambio de almacenamiento o Recarga al acuífero (mm)	-30,4	-20,6	-9,6	16,2	66,7	121,8	99,8	138,1	126,8	-1,9	-65,4	-44,0	397,4	8.757.648,43	23,19

ANEXO B

1. Análisis de la afectación del Cambio Climático en el acuífero de Nejapa.

El análisis por afectación del cambio climático para el acuífero de Nejapa involucra la variación por Precipitación media anual, el incremento de Temp° que incrementará la evapotranspiración potencial y la reducción de la cobertura arbórea.

Para ello se ha tomado como base las proyecciones bajo el escenario de emisiones A2 que se hizo en el estudio centroamericano de "Informe Síntesis Economía del Cambio Climático CEPAL, 2010"

1.1 proyección de Incremento de Temperatura

El incremento de la temperatura se establece en la tabla B-1. En la misma puede observarse un incremento de 2.03 °C para el año 2050.

Tabla b-1

CENTROAMÉRICA: CAMBIO DE TEMPERATURA MEDIA
ESCENARIO A2, PROMEDIO DE TRES MODELOS, 1980-2000 A 2100
(En grados centígrados)

País	2020	2030	2050	2050	2100
Costa Rica	0,63	0,77	1,60	2,43	3,90
Belice	0,70	0,83	1,53	2,37	3,70
El Salvador	0,77	0,93	2,03	2,90	4,73
Guatemala	0,80	1,00	2,00	2,93	4,73
Honduras	0,73	0,87	1,83	2,73	4,20
Nicaragua	0,73	0,87	1,90	2,73	4,30
Panamá	0,63	0,77	1,47	2,30	3,60
Centroamérica	0,70	0,83	1,73	2,60	4,17

Mediante la aplicación del método de Blanney - Criddle para el cálculo de la evapotranspiración potencial, y mediante un incremento de 2°C se puede determinar que la misma experimentará un incremento de 4.8% en proyección hacia el año 2050. Los resultados y análisis se presentan en la tabla b-2

Tabla b-2

ANÁLISIS DE INCREMENTO DE 2°C Temp en proyección 2050 y su incidencia en la Evap													
Variables	ene	feb	mar	abri	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic	anual
temp media °C	23	25,5	25	24	24,5	25	26	25	25	24	23	22	
horas sol (%)	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25	
Evtp (mm/día)	4,86	5,16	5,30	5,37	5,63	5,69	5,83	5,50	5,50	5,18	4,86	4,56	
Evtp (mm/mes)	150,8	144,6	164,3	161,0	174,4	170,8	180,6	170,4	164,9	160,5	145,9	141,4	1929,619
	ene	feb	mar	abri	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic	anual
temp media °C	25	27,5	27	26	26,5	27	28	27	27	26	25	24	
horas sol (%)	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25	
Evtp (mm/día)	5,10	5,40	5,55	5,63	5,89	5,96	6,09	5,75	5,75	5,42	5,10	4,79	
Evtp (mm/mes)	158,2	151,3	172,0	168,8	182,7	178,8	188,9	178,4	172,6	168,2	153,1	148,6	2021,426
Incremento													4,80%
ANÁLISIS DE INCREMENTO DE TEMP°C (formula de Blanney Criddle) Etp = p * (0,46 * T*(°C)+8,13)													
p= % de horas de sol en el mes con respecto al total anual													
T= Temperatura en °C													

1.2 proyección de disminución de la precipitación (mm)

En la tabla b-3 se presentan las proyecciones establecidas por el estudio de CEPAL. En la misma se puede observar que El Salvador experimentará una reducción de lluvia media anual de 15.23% hacia el año 2050 con respecto a la lluvia promedio del periodo 1980-2000.

Tabla b-3

CENTROAMÉRICA: CAMBIO DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL ESCENARIO A2, PROMEDIO DE TRES MODELOS, 1980-2000 A 2100 (En porcentajes)

País	2020	2030	2050	2070	2100
Costa Rica	1,77	3,87	-12,47	-14,83	-26,53
Belize	-3,47	-0,13	-15,23	-16,93	-30,17
El Salvador	-2,67	-0,63	-15,23	-15,73	-31,27
Guatemala	-1,53	-1,33	-12,73	-14,17	-26,80
Honduras	-2,20	4,17	-15,70	-17,43	-32,03
Nicaragua	-0,60	4,87	-17,93	-17,73	-34,87
Panamá	1,53	1,97	-7,97	-9,93	-17,53
Centroamérica	-1,03	1,83	-13,87	-15,27	-28,43

La precipitación en la zona alta de la cuenca del río San Antonio presentaría el comportamiento reflejado en la tabla b-4

Tabla b-4

Cambio de precipitación media anual, Escenario A2 en proyección para los años 2020, 2030 y 2050		
2020	2030	2050
-2,67	-0,67	-15,64
1948,40	1948,40	1948,40
1896,38	1935,35	1643,67

1.3 Proyección de disminución de la cobertura arbórea (%)

La proyección de la disminución de la cobertura arbórea de acuerdo al informe de CEPAL, se estima en una disminución del 33% de la cobertura actualmente existente hacia el año 2050. Esto tendría un impacto directo sobre capacidad de infiltración del suelo y por consiguiente en una reducción del coeficiente de cultivo K_v en el análisis del índice de infiltración.

Mediante la aplicación del método de abstracciones por infiltración del Soil Conservation Service (SCS) se llevó a cabo el análisis de reducción de infiltración en la medida que se va disminuyendo la cobertura arbórea. Así en la tabla b-5 se presenta el análisis para las condiciones actuales donde se posee una muy buena cobertura arbórea en la zona I considerándose 95% bosque de sombra y café; y 5% usos suburbanos.

Tabla b-5

DETERMINACION DEL ESCURRIMIENTO Y ABSTRACCION POR INFILTRACION GENERADO EN LA PARTE MEDIA ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN ANTONIO BAJO LAS CONDICIONES ACTUALES DE USO DE SUELO (2013) Y UNA LLUVIA TIPICA DE 30 MINUTOS DE DURACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO INFERIOR A 2 AÑOS (Cobertura Arbórea 95%; Cobertura no arbórea: 5%)			
Area de la subcuenca río San Antonio	18,64	Km ²	
Precipitación Total para período de retorno de 2 años o el equivalente a una lluvia típica interanual:	60		
Duración de Lluvia:	30	min	
Intensidad de Lluvia: 2.00 mm/min			
TIEMPO (min)	% DE DISTRIBUCION	DISTRIBUCION DE PREC. TOTAL (mm)	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)
30	100,00	60,00	60,00
60,00			
Número de Curva CN de acuerdo al SCS:			
Grupo Hidrológico del Suelo:	B	Equivalente a suelos franco - arenosos en la nomenclatura del SCS	
Descripción del Uso de la Tierra	CN II	CN III (condiciones húmedas)	% Area
Zonas suburbanas y cultivadas	70,00	84,29	0,05
Café y Bosque	55,00	73,76	0,95
CN PONDERADO	55,75	74,29	1
Retención Potencial (S) (mm):	87,91		
Abstracción inicial antes del encharcamiento (Ia): (mm)	17,58		
TIEMPO (min)	Profundidad adicional del agua retenida en la cuenca Fa	Prec. de excesos Pe (mm)	Hietograma de Precipit. de Excesos (mm)
30	28,61	13,80	13,80
Precipitación que produce el escurrimiento (Pe)			
		13,80	
Escurrecimiento Directo (Pe)		13,80	mm
Abstracciones (Intercepción por la vegetación del terreno, almacenamiento superficial por depresiones e infiltración):		46,20	mm
Porcentaje de Abstracciones o preservación hídrica en el sistema en relación a la precipitación (%):		76,99	

En la tabla b-6 se presenta el análisis cuando la cobertura se vera reducida obteniéndose 77% de bosque y café; 23% otros usos suburbanos y cultivos. En la tabla b-7 se presenta el análisis para un uso de suelo correspondiente a 62%

cobertura arbórea y 38% otros usos no arbóreos. A final del periodo se ha obtenido una reducción en la infiltración de 8.02%

Tabla b-6

DETERMINACION DEL ESCURRIMIENTO Y ABSTRACCION POR INFILTRACION GENERADO EN LA PARTE MEDIA ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN ANTONIO BAJO LAS CONDICIONES PROYECTADAS DE USO DE SUELO (2030) Y UNA LLUVIA TÍPICA DE 30 MINUTOS DE DURACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO INFERIOR A 2 AÑOS (Cobertura Arbórea 77%; Cobertura no arbórea: 23%)			
Area de la subcuenca Rio San Antonio		18,64	Km ²
Precipitación Total para período de retorno de 2 años o el equivalente a una lluvia típica interanual:		60	mm
Duración de Lluvia:		30	min
Intensidad de Lluvia: 2.00 mm/min			
TIEMPO (min)	% DE DISTRIBUCION	DISTRIBUCION DE PREC. TOTAL (mm)	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)
30	100,00	60,00	60,00
60,00			
Número de Curva CN de acuerdo al SCS:			
Grupo Hidrológico del Suelo:		B	
Descripción del Uso de la Tierra		CN II	CN III (condiciones húmedas)
Zonas suburbanas y cultivadas		70,00	84,29
Café y Bosque		55,00	73,76
CN PONDERADO		58,45	76,18
Retención Potencial (S) (mm):		79,41	
Abstracción inicial antes del encharcamiento (Ia): (mm)		15,88	
TIEMPO (min)	Profundidad adicional del agua retenida en la cuenca Fa	Prec. de excesos Pe (mm)	Hietograma de Precipit. de Excesos (mm)
30	28,36	15,76	15,76
Precipitación que produce el escurrimiento (Pe)			15,76
Escurrecimiento Directo (Pe)			15,76 mm
Abstracciones (Intercepción por la vegetación del terreno, almacenamiento superficial por depresiones e infiltración):			44,24 mm
Reducción de la abstracción o infiltración (mm) por efecto de la deforestación para las condiciones del 2050 con referencia al periodo de observación actual		1,95	mm
Reducción porcentual de las condiciones proyectadas para el año 2030 con respecto al periodo de observación actual		4,23%	%

Tabla b-7

DETERMINACION DEL ESCURRIMIENTO Y ABSTRACCION POR INFILTRACION GENERADO EN LA PARTE MEDIA ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN ANTONIO BAJO LAS CONDICIONES PROYECTADAS DE USO DE SUELO (2050) Y UNA LLUVIA TIPICA DE 30 MINUTOS DE DURACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO INFERIOR A 2 AÑOS (Cobertura Arbórea 62%; Cobertura no arbórea: 38%)			
Area de la subcuenca río San Antonio equivalente a una lluvia típica interanual:		18,64	Km ²
Duración de Lluvia:		60	
		30	min
Intensidad de Lluvia: 2.00 mm/min			
TIEMPO (min)	% DE DISTRIBUCION	DISTRIBUCION DE PREC. TOTAL (mm)	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)
30	100,00	60,00	60,00
		60,00	
Número de Curva CN de acuerdo al SCS:			
Grupo Hidrológico del Suelo:		B	nomenclatura del SCS
Descripción del Uso de la Tierra	CN II	CN III (condiciones húmedas)	% Area
Zonas suburbanas y cultivadas	70,00	84,29	0,38
Café y Bosque	55,00	73,76	0,62
CN PONDERADO	60,70	77,76	1
Retención Potencial (S) (mm):		72,63	
Abstracción inicial antes del encharcamiento (Ia): (mm)		14,53	
TIEMPO (min)	Profundidad adicional del agua retenida en la cuenca Fa	Prec. de excesos Pe (mm)	Hietograma de Precipit. de Excesos (mm)
30	28,61	13,80	13,80
		Precipitación que produce el escurrimiento (Pe)	13,80
		Escurrecimiento Directo (Pe)	17,51 mm
Abstracciones (Intercepción por la vegetación del terreno,			42,49 mm
Porcentaje de Abstracciones o preservación hídrica en el sistema en relación a la precipitación (%):			70,82
Reducción de la abstracción o infiltración (mm) por efecto de la deforestación para las condiciones del 2050 con referencia al periodo de observación actual		3,70	mm
Reducción porcentual de las condiciones proyectadas para el año 2050 con respecto al periodo de observación actual		8,02%	%

Con los valores obtenidos proyectados se desarrolla nuevamente el balance hídrico aplicando la metodología de Shosinsky. Para ello se incorporan los valores promedios del periodo de proyección tal como se expresan en la tabla b-8. Una precipitación anual de 1839 mm; una evapotranspiración potencial de 1375 mm y la reducción equivalente de cobertura arbórea que afecta el Kv, estimándose un kv de 0.16.

Tabla b-8

PARAMETROS AFECTADOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO			
	2013	2045	promedio del período
Reducción de Precipitación (mm) (-11.24%)	1948,4	1729,4	1839
Incremento de Incremento Evapotranspiración potencial (mm) (+4.80%)	1343	1407	1375
Reducción de cobertura arbórea (%) (-33%)	95	62	79

En la tabla b-9 se presenta el desarrollo del balance hídrico por el método de Shosinsky y se obtiene una recarga de 470.09 mm para todos los años del periodo comprendido entre 2013 y 2045.

Esta recarga ocasiona una disminución en el volumen total de recarga anual, estableciéndose en 15.84 Mmt³, tal como se presenta en la tabla b-10.

Tabla b-9

BALANCE HIDRICO DE SUELOS
Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: ZONA I BAJO AFECTACION POR EL CAMBIO CLIMÁTICO

Fecha:

Textura de Suelo: Formación Geológica principal S2 - S4 Suelo franco Andisoles

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de Iluvia

fc [mm/d]	188,30
Kp [0.01%]	0,09
Kv [0.01%]	0,16
Kfc [0.01%]	0,64656
I [0.01%]	0,89956
DS (g/cm ³):	1,40
PR (mm)	1000,00
HSi (mm)	364,00
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,17

	por peso (%)	(mm)
CC	26,00	364,00
PM	12,00	168,00
(CC-PM)	14,00	196,00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	3,40	2,00	11,20	47,60	147,00	320,00	341,00	376,00	345,00	198,00	35,00	13,00	1839,20
Ret [mm]	3,40	2,00	5,00	8,09	24,99	54,40	57,97	63,92	58,65	33,66	5,95	5,00	323,03
Pi (mm)	0,00	0,00	5,58	35,54	109,76	238,92	254,60	280,73	257,59	147,83	26,13	7,20	1363,88
ESC (mm)	0,00	0,00	0,62	3,97	12,25	26,68	28,43	31,35	28,76	16,51	2,92	0,80	152,29
ETP (mm)	107,00	111,00	124,00	121,00	119,00	122,00	131,00	127,00	107,00	109,00	101,00	96,00	1375,00
HSi (mm)	261,02	224,10	201,33	190,08	201,03	250,41	364,00	364,00	364,00	364,00	364,00	308,42	
C1	0,47	0,29	0,20	0,29	0,73	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,75	
C2	0,22	0,12	0,07	0,11	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,62	0,38	
HD (mm)	93,02	56,10	38,90	57,62	142,78	321,33	450,60	476,73	453,59	343,83	222,13	147,62	
ETR (mm)	36,92	22,78	16,83	24,59	60,37	122,00	131,00	127,00	107,00	109,00	81,71	54,60	893,79
HSf (mm)	224,10	201,33	190,08	201,03	250,41	364,00	364,00	364,00	364,00	364,00	308,42	261,02	
DCC (mm)	139,90	162,67	173,92	162,97	113,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55,58	102,98	
Rp (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,33	123,60	153,73	150,59	38,83	0,00	0,00	470,09
NR (mm)	209,98	250,90	281,10	259,38	172,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74,87	144,38	1392,82

Tabla b-10

Recarga Calculada con Cambio Climático			
Zona	Recarga acuífera por zona (mm)	Area por zona Km ²	Volumen Millones de Mt ³
I	470,09	18,64	8,76
II	378,17	14,5	5,48
III	259,81	3,92	1,02
IV	159,63	3,6	0,57
Area de la cuenca		40,66	15,84
Recarga ponderada (mm)			389,55

ANEXO C

TABLAS CON PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE REFERENCIA

VALORES DE LA PERMEABILIDAD (según autores)

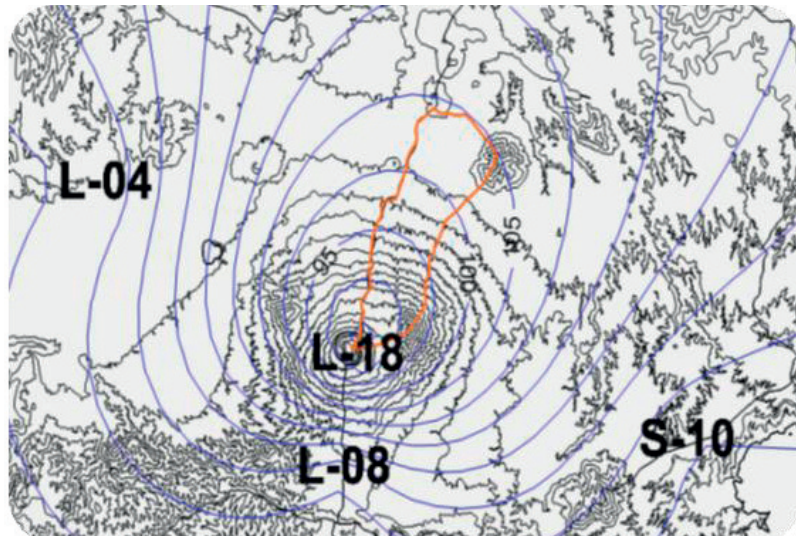
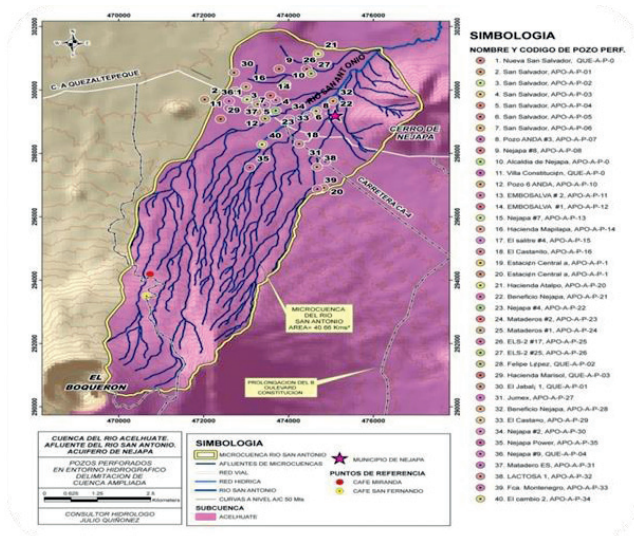
K (m/día)	Calificación estimativa
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

VALORES DE LA TRANSMISIVIDAD (según autores)

T (m ² /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
$T < 10$	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
$10 < T < 100$	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
$100 < T < 500$	Media a alta	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
$500 < T < 1.000$	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
$T > 1.000$	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.


VALORES DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (según autores)


Tipo de material permeable	Forma del funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
<i>Kárstico:</i>		
Caliza y dolomías jurásicas	Libre	2×10^{-2}
	Semiconfinado	5×10^{-4}
	Confinado	5×10^{-5}
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
<i>Poroso intergranular:</i>		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
<i>Kársticos y porosos:</i>		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$



www.forodelagua.org.sv

email: comunicaciones@forodelagua.org.sv

 [youtube.com/ForodelAgua/SV](https://www.youtube.com/ForodelAgua/SV)

 [ForodelAguaElSalvador](https://www.facebook.com/ForodelAguaElSalvador)

Con el apoyo solidario de:

