

**HIDROGEOLOGÍA DEL SECTOR DE SAN CARLOS
ALAJUELA, COSTA RICA**

Elaborado para:

**Programa de Investigación en Desarrollo Urbano
Sostenible (ProDUS) de la Universidad de Costa Rica**

Elaborado por:

**M.Sc. Héctor Enrique Zúñiga Mora
C.G.C.R. N° 259**

Julio 2011

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	OBJETIVO GENERAL	4
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	6
3	GEOLOGÍA	6
3.1	ESTRATIGRAFÍA.....	6
3.1.1	<i>Formación Machuca (To).....</i>	<i>8</i>
3.1.2	<i>Formación Venado (Tmm).....</i>	<i>8</i>
3.1.3	<i>Formación Cureña (TmP).....</i>	<i>8</i>
3.1.4	<i>Formación Monteverde.....</i>	<i>9</i>
3.1.5	<i>Formación Cote (Qt-PV).....</i>	<i>9</i>
3.1.6	<i>Volcánico Reciente (QV).....</i>	<i>9</i>
3.1.7	<i>Depósitos aluviales indiferenciados (Qal).....</i>	<i>12</i>
4	HIDROLOGÍA.....	13
4.1	METEOROLOGÍA	13
4.1.1	<i>Precipitación</i>	<i>13</i>
4.1.2	<i>Temperatura</i>	<i>16</i>
4.1.3	<i>Brillo Solar</i>	<i>16</i>
4.1.4	<i>Humedad relativa.....</i>	<i>16</i>
4.2	BALANCE HÍDRICO DE SUELOS Y RECARGA POTENCIAL	21
4.2.1	<i>Uso actual del suelo.....</i>	<i>22</i>
4.2.2	<i>Infiltración, punto de marchites y capacidad de campo</i>	<i>30</i>
4.2.3	<i>Evapotranspiración</i>	<i>30</i>
4.2.4	<i>Recarga potencial en el área de estudio.....</i>	<i>33</i>
5	HIDROGEOLOGÍA.....	37
5.1	HIDROGEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	37
5.1.1	<i>Características y producción de los pozos</i>	<i>37</i>
5.1.2	<i>Líneas isofreáticas y dirección del flujo subterráneo</i>	<i>47</i>
5.1.3	<i>Parámetros hidráulicos del acuífero.....</i>	<i>49</i>
5.2	MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO	50
5.3	VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN.	51
6	CONCLUSIONES.....	58
7	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	5
FIGURA 2: MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO. TOMADO Y MODIFICADO DE PRODUS (2010). ...	7
FIGURA 3: ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y ALREDEDORES. FUENTE: PRODUS (2011).....	14
FIGURA 4. FUENTE: INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL (2011) E ICE (2011).....	15
FIGURA 5. FUENTE: INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL (2011) E ICE (2011).....	19
FIGURA 6. FUENTE: INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL (2011) E ICE (2011).....	20

FIGURA 7: PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO. TOMADO Y MODIFICADO DE PRODUS (2011).....	23
FIGURA 8: PRECIPITACIÓN INTERCEPTADA EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	24
FIGURA 9: FACTOR DE PENDIENTE DEL TERRENO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	25
FIGURA 10: FACTOR DE CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.....	26
FIGURA 11: MAPA DEL USO DE SUELO EN EL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: PRODUS (2011).....	27
FIGURA 12: DISTRIBUCIÓN DEL USO DEL SUELO EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	28
FIGURA 13: FACTOR DE VEGETACIÓN PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	29
FIGURA 14: TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	31
FIGURA 15: EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ANUAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN EL MÉTODO DE HOLDRIDGE.	32
FIGURA 16: RECARGA DIRECTA (MM POR AÑO) PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.....	34
FIGURA 17: RECARGA DIRECTA (M ³ / AÑO) PARA CADA CELDA DE ANÁLISIS.....	35
FIGURA 18: ZONAS DE RECARGA DIRECTA (MM / AÑO) PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	36
FIGURA 19: MAPA DE UBICACIÓN DE POZOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: SENARA (2011). ...	40
FIGURA 20: MAPA DE UBICACIÓN DE NACIENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: DIRECCIÓN DE AGUA, MINAET (2011).	46
FIGURA 21: MAPA DE CURVAS ISOFREÁTICAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	48
FIGURA 22: ESQUEMA DEL SISTEMA GOD. TOMADO DE FOSTER ET. AL (2003).....	52
FIGURA 23: PARÁMETRO “G” DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD GOD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	53
FIGURA 24: PARÁMETRO “O” DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD GOD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	54
FIGURA 25: PARÁMETRO “D” DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD GOD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.....	55
FIGURA 26: ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA GOD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.....	56
FIGURA 27: MAPA DE NO CONFORMIDADES EN EL USO DEL SUELO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.....	57

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1: ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y ALREDEDORES.....	13
CUADRO 2: PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL REGISTRADA EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y SUS ALREDEDORES.	17
CUADRO 3: TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL REGISTRADA EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y SUS ALREDEDORES.	17
CUADRO 4: BRILLO SOLAR PROMEDIO MENSUAL REGISTRADO EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y SUS ALREDEDORES.	18
CUADRO 5: HUMEDAD PROMEDIO MENSUAL REGISTRADA EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y SUS ALREDEDORES.	18
CUADRO 6: COMPONENTES DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN (SCHOSINSKY & LOSILLA, 2000)	21
CUADRO 7: ÁREA CUBIERTA POR LAS DISTINTAS CATEGORÍAS DE USO DE SUELO.	22
CUADRO 8: CARACTERÍSTICAS REGISTRADAS EN LOS POZOS DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO.	37
CUADRO 9: MANANTIALES PRESENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	41
CUADRO 10: USOS DEL AGUA EN EL ÁREA DE ESTUDIO	45
CUADRO 11: PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS PARA TRES POZOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	50

1 INTRODUCCIÓN

El área de estudio (Figura 1) se ubica dentro de las coordenadas 1.133,012 – 1.159,480 Norte y 438,911 – 467,374 Este de la proyección CRTM05. El área de la cuenca es de 559,66 km².

Desde el punto de vista político – administrativo, el área de estudio se ubica dentro del cantón de San Carlos, cubriendo específicamente los distritos de Aguas Zarcas, Palmera, Florencia, Buena Vista y Quesada. (Figura 1)

Al área de estudio se accede por vía pública, pavimentada o en grava, a dos carriles y en regular estado de conservación.

El presente informe incluye el análisis de la información existente de las aguas subterráneas y proponer una zonificación y medidas de protección y manejo de los recursos hídricos de un sector del cantón de San Carlos, en la región Huertar Norte de Costa Rica, para contribuir a la formulación de su Plan Regulador

1.1 Objetivo General

Realizar los estudios técnicos sobre variables hidrogeológicas necesarias, orientadas al manejo y conservación de los acuíferos para el abastecimiento de agua potable y otros usos en parte del cantón de San Carlos.

1.2 Objetivos Específicos

En forma básica, los objetivos específicos de la presente investigación son:

- Analizar la información hidrogeológica secundaria referida al cantón de San Carlos, para la planificación del abastecimiento de agua potable y otros usos. El nivel de detalle depende de la disponibilidad de información en las diferentes zonas de estudio.
- Estimar el potencial de agua en cuanto a cantidad, calidad y disponibilidad con base en información secundaria (SENARA, MINAE y AyA).
- Determinar las áreas de recarga y de descarga con base en información secundaria, con el propósito de hacer un mejor ordenamiento territorial.
- Hacer una propuesta de zonificación y regulaciones para el manejo del recurso hídrico y uso de la tierra.

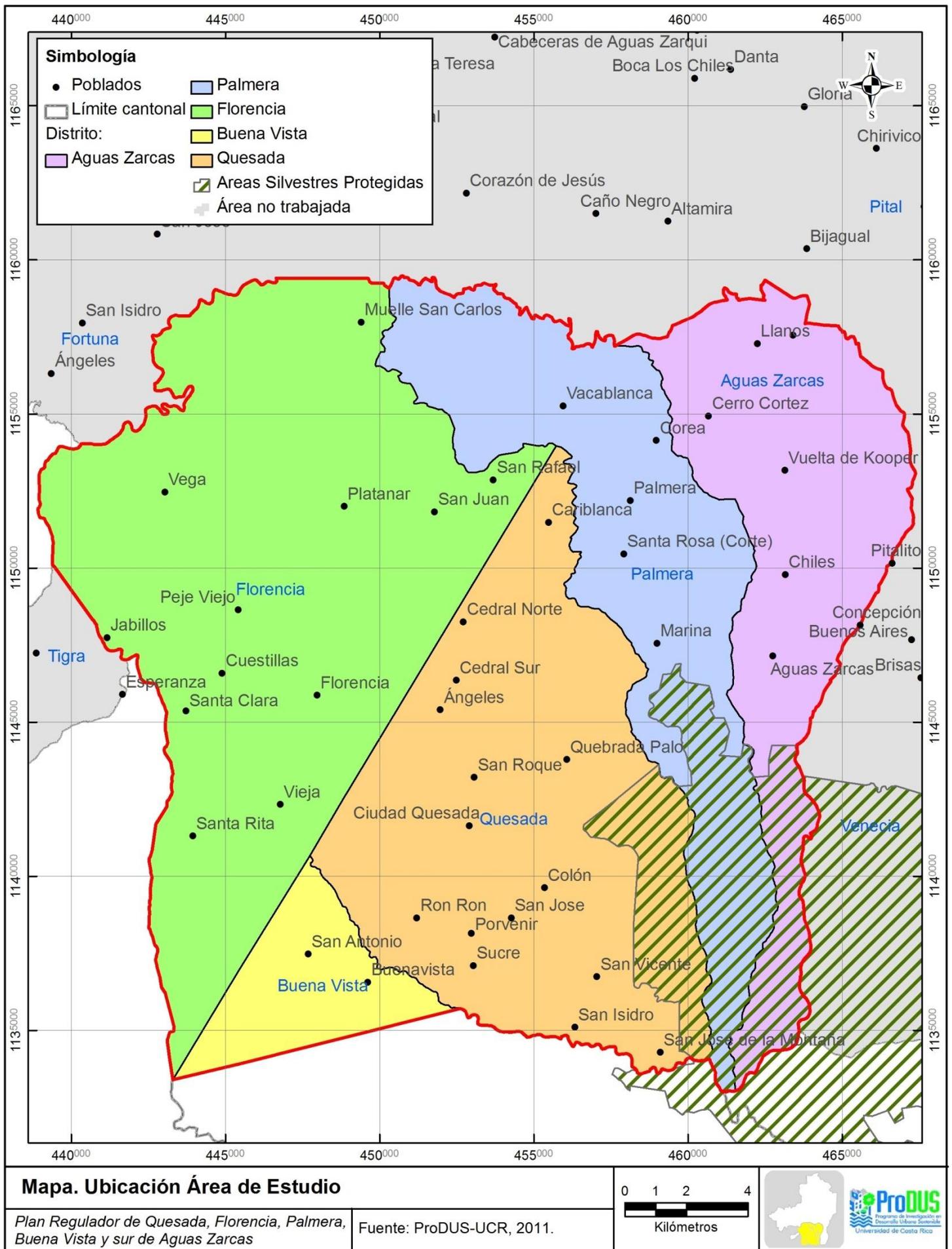


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo incluyó las siguientes actividades:

- Se consultó información existente referida al área de estudio. Las fuentes consultadas fueron:
 - Instituto Geográfico Nacional: identificación de las fotografías aéreas correspondientes al área de estudio, mapas a escala 1:50.000 y 1:200.000.
 - Base de datos de la Dirección de Gestión Hídrica del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento: información de pozos y perforaciones, específicamente ubicación, nivel estático, caudal recomendado, etc.
 - Registro Nacional de Concesiones de Agua de la Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones: ubicación de fuentes, concesionarios, tipo de fuente, caudal concesionada, etc.
 - Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS) de la Universidad de Costa Rica: archivos digitales tipo “shape” de la zonificación del área de estudio de acuerdo a:
 - Uso potencial del suelo.
 - Clasificación agronómica del suelo.
 - Uso actual del suelo.
 - Información climática (precipitación, temperatura, etc).
- Se realizó 1 gira de reconocimiento, en la cual se recorrió el área de estudio en su parte alta y baja.
- Análisis de la información primaria y secundaria recopilada.
- Elaboración del informe final.

3 GEOLOGÍA

El presente capítulo fue tomado textualmente del Informe de “Geología y Geomorfología del Cantón de San Carlos”, elaborado por el Geól. Luis Guillermo Salazar para ProDUS (2010).

Según este documento, en el área de estudio afloran las siguientes unidades geológicas:

3.1 Estratigrafía

A continuación se describirán las formaciones regionales, que cubren el área de interés. Las mismas se describen de las más antiguas a las más recientes, su distribución puede observarse en el mapa geológico (Figura 2). Prácticamente toda la zona está recubierta de cenizas recientes de los centros volcánicos de la zona los cuales son relativamente recientes y solo en algunos sitios muy puntuales en donde la erosión fluvial y antrópica han dejado las rocas más antiguas y profundas topográficamente al descubierto, al eliminarse, la gruesa cobertura de materiales piroclásticos que recubren la zona. Por lo tanto es común hallarlas en los fondos y paredes de los ríos o en los cortes artificiales de carreteras y caminos de las zonas, así como en los taludes que quedan como testigos de desarrollo de la infraestructura de la zona como caminos, carreteras, etc. En el mapa geológico se muestra la distribución de las diferentes unidades.

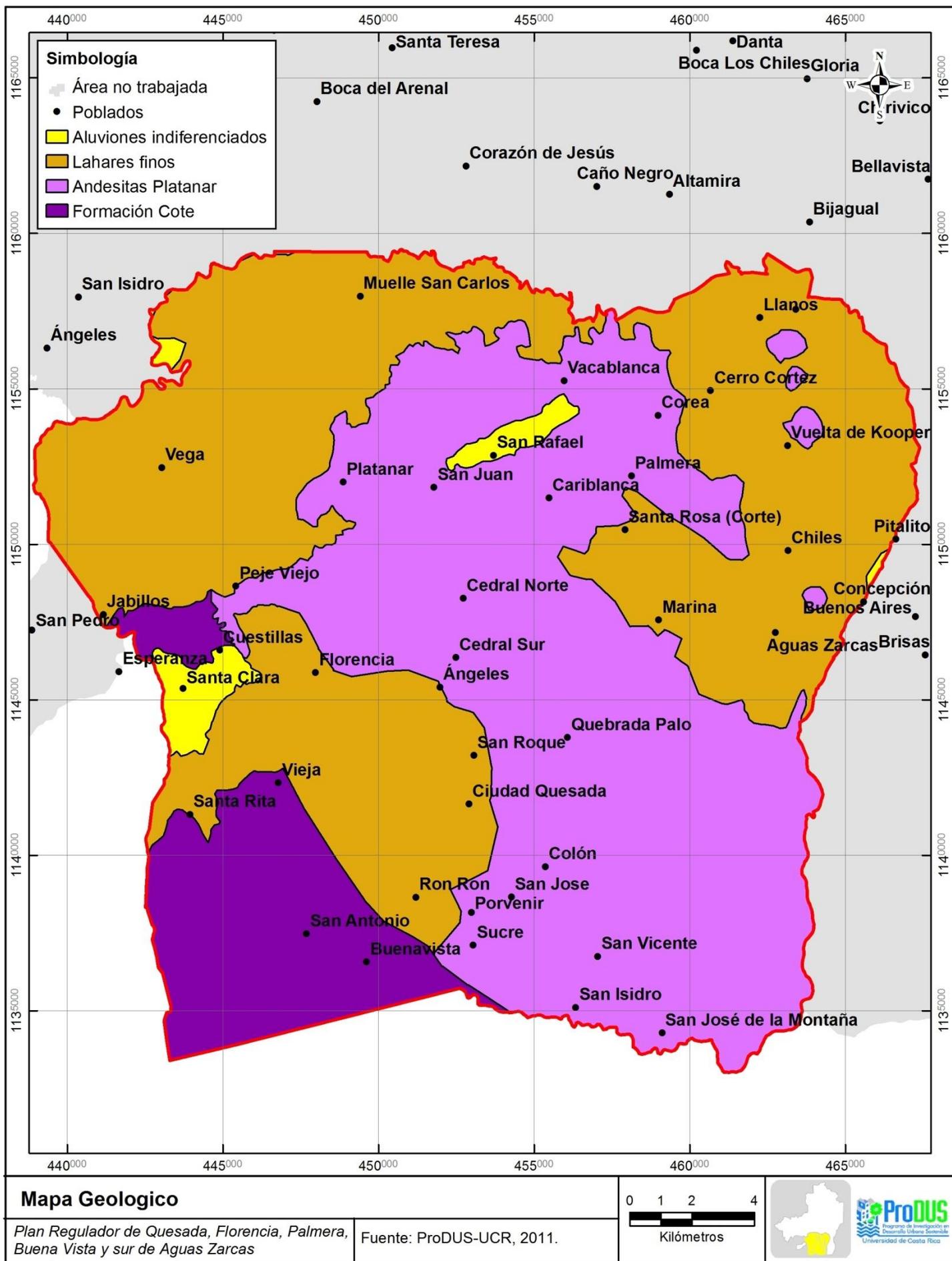


Figura 2: Mapa geológico del área de estudio. Tomado y modificado de ProDUS (2010).

3.1.1 Formación Machuca (To)

Aflora entre el Castillo Viejo y el Río Crucita del norte, como una secuencia de rocas sedimentaria, que fueron descritas por Hayes (1899). Las rocas están sumamente silificadas, cortadas por filones de cuarzo de más de tres metros de espesor, además posee una gran cantidad de piritas secundarias, por ello es difícil ver sus líneas estructurales. Las rocas son areniscas finas y lutitas de color verde. Se estima su edad en Oligoceno.

3.1.2 Formación Venado (Tmm)

Aflora cerca de los caseríos de Venado y Jicarito, es sobreyacida por una espesa capa de lavas basálticas de la Formación Aguacate. Está constituida por una secuencia sedimentaria de origen marino, asociado a un ambiente de estero o marisma. Está conformada por calizas, calcarenitas, lutitas limonitas y areniscas. Se caracteriza por una fauna rica en ostrácodos, foraminíferos y pelecípodos. Entre los ostrácodos se han reconocido los géneros: Paracypris, Citheridea, Loxoconcha y Hemicythere. Los géneros de los pelecípodos son: Pecten Sp. Además se encuentran capas de carbón de tipo lignito. Todo indica que el ambiente fue salobre.

3.1.3 Formación Cureña (TmP)

Se localizan al extremo norte del área de estudio, están constituidas sobre todo por las Lomas del Sierpe Azul y afines.

Es una unidad compuesta por basaltos alcalinos de color gris azulado, constituidos por una matriz afanítica (muy fina, inclusive con lupa) y fenocristales de olivino.

DENGO (1962) y MACDONALD (1972), interpretaron las Llanuras del Caribe como una depresión vulcano-tectónica, en donde se levantan una serie de pequeños cerros y conos volcánicos. (ALVARADO, 1984)

MALAVASSI, E & CHAVES, E., 1970, la describen y le asignan el nombre de **Vulcanismo Cuaternario "Intragraben", de Tortuguero, Sierpe, Zapote y Coronel**. Denominadas en su mapa como (Qvi), posteriormente fue denominada Formación Cureña por MALAVASSI y MADRIGAL, 1970 (ver Figura 2), describiéndola como pequeños macizos montañosos de origen volcánico.

Las Lomas de Sierpe, también conocidas como Las Lomas Azules, son una cadena de cerros y pequeñas lomas aisladas, algunas de ellas de forma cónica, situadas al sur del Cerro Tortuguero. Cubre una superficie de 70 km², en ALVARADO (1984).

MALAVASSI, E & CHAVES, E. (1970), creen que debió existir un pequeño archipiélago, en el lugar donde hoy encontramos esos cerros y que gran parte quedó sepultada por los sedimentos acarreados por los ríos, sin embargo esta teoría parece poco probable debido a que en la zona no existe evidencia de depósitos marinos, lo que indica que todos los sedimentos fueron depositados sobre el nivel del mar. También proponen que este archipiélago es el marco y el ancla que sostiene la actual llanura de inundación del Río San Juan y otros ríos de la vertiente Norte - Caribe de Costa Rica; si no fuera por esas antiguas islas, los sedimentos traídos por esos ríos no se hubieran depositado en esta área, sino que hubieran sido barridos por las corrientes litorales y trasladados a otros lugares más al sur.

La composición mineralógica de las rocas que forman esos cerros es la de un basalto olivínico - augítico, con augita titanífera. En otros cerros como El Cerro Tortuguero acusa por la cantidad de "lapilli" presentes en actividad volcánica tipo foco central. Por su posición dentro de la "Fosa de Nicaragua" se interpreta que el vulcanismo que originó los cerros de esta área como Cuaternario, más joven que el anterior o de "Perigraben". Las rocas son de tipo Teralita (muestra 2, en MALAVASSI y CHAVES, 1970). Roca intrusiva tipo alcalino, rica en elementos férricos, que contrasta con el tipo alcalicálcico de la serie gabrodiorítica. Trátase de un magma a tendencia Caribe.

Estructura porfirítica holocristalina de tipo pilotaxítica. Los fenocristales son de olivino y clinopiroxeno augita. Estos asumen, respecto a la plagioclasa, confinada a la pasta fundamental, mayor importancia. La matriz está constituida por microlitos de nefelina, plagioclasa y abundantes óxidos de Fe y Ti.

Característica de esta roca es la presencia de titanoaugita (c:=53) con extinción de clepsidra ya observada en otras rocas de la provincia atlántica.

3.1.4 Formación Monteverde

Está compuesta por espesos depósitos de ignimbritas en la base, que son sobreyacidos por una serie de lavas andesíticas y andesítico - basálticas con basaltos subordinados, así como megabrechas volcánicas de diferentes orígenes, todas asociadas cronoestratigráfica de esta Formación.

Han sido reconocidos formando diques hipoabisales y relictos volcánicos. Los diques tienen espesores que varían desde decimétricos hasta métricos, intruyendo al Grupo Aguacate subverticalmente y contrastan por no presentar alteración hidrotermal. Petrográficamente son fenoandesitas afanítica - porfirítica con fenocristales de plagioclasa hipidiomórfica tabular y piroxenos.

Hoy día se reconocen algunos relictos volcánicos en vías de erosión que presumiblemente están formados por andesitas de la Formación Monteverde (aun sin confirmar), por ejemplo el Relicto Agua Gata, cuya característica esencial es que parece haber sido alimentado por diques como los mencionados anteriormente.

En la zona la Formación Monteverde sobreyace discordantemente a la Formación Aguacate.

Dataciones radiométricas efectuadas indican una edad de 1,3 a 1,1 M.a. -Pleistoceno Inferior-. Estas lavas afloran desde Tilarán y la Reserva Monteverde, hasta los alrededores de la Laguna Pocosol y en las partes altas del Río Peñas Blancas.

3.1.5 Formación Cote (Qt-PV)

Aflora en toda la zona al norte de Laguna de Arenal y Cote hacia Cabanga, presenta capas gruesas de material piroclástico, que consiste de cenizas, lapilli y tobas. Su edad es de Plioceno hasta el Cuaternario.

3.1.6 Volcánico Reciente (QV)

Estos tipos de depósitos no son cartografiables a la escala utilizada, pero por su riqueza son dignos de mencionar.

3.1.6.1 Depósitos volcánicos de los volcanes Platanares y el Complejo volcánico Porvenir, Viejo, El Siete y Pelón

3.1.6.1.1 Vulcanismo del Pleistoceno (QV1)

Está representado por los volcanes Platanar y Porvenir que se describen adelante

3.1.6.1.2 Volcán Platanar (QP-Pla)

De 2183 m.s.n.m., conocido en la región como volcán, se localiza a unos 8 km al sureste de Ciudad Quesada. Es un estratovolcán por el momento inactivo (90 km²), presenta en su parte superior un cráter destruido al noroeste. Hacia el noreste de este cráter erosionado se hallan restos de un antiguo borde caldérico (aprox. 1860 m.s.n.m.). Posee coladas prehistóricas en sus flancos oeste y noroeste. Petrográficamente son basaltos hasta andesitas piroxénicas y en el flanco suroeste del cono se presenta una cubierta de piroclastos, detritos y brechas volcánicas, así como lahares y aluviones (Alvarado y Carr, 1993).

3.1.6.1.3 Volcán Porvenir (QP-Po)

Consiste en un estratovolcán pequeño (430 m de elevación sobre el terreno circundante; cubre un área de 15 km²), que posee en su cima un borde caldérico erosionado y truncado en su lado este, en el interior del cual se encuentra un cono de poca elevación (unos 20 a 40 m) que presenta un cráter de unos 160 m de diámetro. Su cúspide está a 2267 m.s.n.m., lo localiza a unos 3 km al sur del volcán Platanar. Varias coladas de lava descienden del flanco suroeste del volcán. La estructura está afectada por varias fallas; una de ellas trunca el cono en su sector este. Al oeste del volcán se ubica una laguna pantanosa de represamiento llamada El Congo, alineada en sentido N-S en correspondencia con un pequeño escarpe de falla con igual orientación.

3.1.6.1.4 Volcán Chato (Qv-Ch)

Alvarado *et al.*, 1988 reconocieron cuatro subunidades en el Volcán Chato y que han sido denominadas: Chato basal (Cb), Chatito (CH), Chato medio (Cm) y Chato Superior (Cs).

Las características químicas de las lavas de estas unidades indican un mayor grado de diferenciación del la subunidad Chatito. La morfología del Chatito y la Espina con apariencia masiva y con brechas lávicas laterales, de deslizamiento indican que esta unidad fue emplazada en forma de domos.

3.1.6.1.5 Volcán Arenal (Qv-Ar)

Los autores anteriores describen la estratigrafía del Arenal e indican que las lavas del mismo se han dividido en cinco subunidades: Bajo Arenal (BA), A4, A3, A2, A1.

Los flujos de lava son de composición andesito - basálticas. Las lavas pueden ser divididas en tres grupos diferentes con base en sus variaciones de químicas.

- I Grupo: rico en alúmina (GRA) e incluye las lavas de las unidades A2 y A4.
- II Grupo: bajo en alúmina (GBA) que incluye los flujos de lava A1, A3 y LA.

- III Grupo: intermedio en alúmina (GIA), incluye los flujos emplazados durante los estados tempranos de las diferentes erupciones, que más tarde dan paso a GRA y GBA.

Algunos troncos carbonizados encontrados dentro de debris del estado tardío de A2, sobre el franco este del Arenal, arrojaron edades de C^{14} más jóvenes de lo que el método en sí puede detectar en forma confiable (aprox. 300 B.P.).

3.1.6.2 Tefras del Arenal y del Chato

3.1.6.2.1 Tefras del Chato (T-Ch)

Sobre los flancos del Chato y áreas vecinas se observan bombas y tobas asociadas por Alvarado *et al.*, 1988 a este Volcán, ver Mapa 1.2-1. Troncos de madera carbonizados colectados entre el Chato y el Chatito y sobre el flanco sureste de la Espina, incluidas entre flujos de piroclastos, resultan con edades de 1550 ± 50 años y de 1560 ± 120 A.C. Posiblemente la edad de 1725 ± 25 años A.C. reportada por Melson *et al.*, 1986 en Alvarado *et al.*, 1988 sugieren que la última actividad freatomagmática del Chato aconteció hace unos 1500 ± 100 años A.C., ver Imágenes 1.2-3 y 1.2-4, mapa geológico.

3.1.6.2.2 Tefras del Arenal (T-A)

Malavassi, 1979 en Alvarado *et al.*, 1988 reconoció al menos 19 capas de tefras asociadas al Volcán Arenal, Melson, 1982 en Alvarado *et al.*, 1988 identifica 9 unidades desde la más reciente ET1 hasta la más antigua ET9.

Estas unidades varían desde basaltos a dacitas. Las unidades andesito - dacíticas (TD) alternan con las unidades andesitas-básicas basaltos (TB).

3.1.6.3 Depósitos de avalancha ardiente del Arenal

Son textural y petrográficamente muy variados, reflejo de los diferentes modos de emplazamiento y del quimismo del magma. Algunos de ellos son:

3.1.6.4 La Palma (NA 1975)

Consiste de brechas caóticas constituidas por bloques de lava y de cumulos con pocas bombas y lapilli, flotando en una matriz arenosa. Afloran en las lagunas la Palma y Cedeño, y localmente en el Río Tabacón. La edad de estos flujos se desconoce, aunque podrían correlacionarse con las unidades más antiguas.

3.1.6.5 Quebrada Guillermina (NA 1235)

Se trata de un detrito volcánico caótico, inconsolidado, constituido por bloques centimétricos y decimétricos de andesitas, fenodacitas y andesitas basálticas junto con eyectas juveniles, bombas y cumulos casuales, todos flotan en una matriz abundante de ceniza y lapilli fino. Hacia la parte superior del flujo se observa un nivel de tefras de 2 m de espesor que corresponde con la nube dispersa asociada al mismo, denominada co - ignimbrita.

3.1.6.6 Pueblo Nuevo (NA 1968)

Consiste de depósitos de explosión lateral (1968) que emplazaron nubes ardientes de pómez y de bloques, oleadas piroclásticas y proyección balística de bloques y bombas, y caída

gravitacional de cenizas. Malavassi *et al.*, 1988, basado en las observaciones de otros autores indica que estos materiales están hoy día retrabajados y describe varios eventos como el de Tabacón conformado por depósitos de avalanchas ardientes ocurridas del 17 al 21 de junio de 1975, emplazadas a altas temperaturas debido al colapso de un cuerpo lávico y posterior generación de avalanchas por colapso de una columna eruptiva -tipo Merapi y Soufriere-. Estas se canalizaron por el valle del Río Tabacón y produjeron un depósito de 10 m de espesor, está constituido por bloques lávicos, algunos de hasta 100 toneladas de peso, estos bloques muestran evidencia de haber estado calientes (tortas de lava, juntas de enfriamiento); por lo menos dos diferentes tipos de lava se han reportado, predominando aquellas similares a las del período eruptivo actual.

3.1.6.7 Depósitos Recientes

Consisten de depósitos aluviales, laháricos, lacustres y coluviales, localmente interestratificados con tefras y lavas recientes o recubriéndoles de forma clara. Se dice que son de edad Holoceno, por lo tanto tienen menos de 80 mil años.

3.1.6.8 Depósitos laháricos finos (Qv-lhf)

Se presenta como grandes extensiones de terrazas y como una continuidad de los Montes de Tilarán al Sur, otra topografía es ligeramente plana. Los lahares son ligeramente complejos, su génesis se relaciona con: deslizamientos, inundaciones de ríos, coluvios, lahares, avalanchas volcánicas y flujos piroclásticos, con una matriz igualmente volcánica. Malavassi & Madrigal (1970) indican que en el campo se pueden diferenciar dos facies de lahares: el fino y el grueso.

En la zona de Buenavista, cerca de San Rafael de Guatuso, en el sitio llamado Las Lomas, se observan cerritos compuestos por rocas andesíticas de cantos rodados (lahar grueso), estas lomas fueron interpretadas como lomas de acúmulo de bloques de basaltos que flotaron sobre una matriz de materiales finos. La facies fina se observa cerca del contacto con la Formación Cureña y hacia el norte, formando las llanuras no inundables de los Chiles, Poco Sol, Medio Queso, etc.

La composición es heterogénea así como su matriz, a veces es arcillosa, arenosa, tobácea, etc; las piezas de roca son: tobas, basalto, andesitas, etc.

Su edad es Pliocuaternaria.

3.1.7 Depósitos aluviales indiferenciados (Qal)

Se localizan a la orilla de los ríos y hacia el norte de de los ríos: Frío, Zapote y Caño Negro, en donde forman grandes llanuras inundables y pantanosas. Son particularmente importantes en los ríos que desembocan en el Río San Juan. Poseen una textura fina rica en materia orgánica, que forman un verdadero sapropel.

El tercio medio de los cauces posee un aluvión más gruesos formado por de arenas y gravas, posee estratificación imbricada, sus espesor sobrepasa ocasionalmente los 10 metros. Otras veces la estratificación es de tipo tabular, con se observa en la boca del río Arenal, siempre posee una gran cantidad de materia orgánica.

La composición litológica de los cantos de aluvión es principalmente de tipo basáltico, así como andesíticos lo que indica su punto de origen en los cerros del área.

4 HIDROLOGÍA

4.1 Meteorología

Los datos meteorológicos de precipitación, temperatura, brillo solar, humedad relativa, radiación y velocidad del viento, fueron obtenidos a través del Instituto Meteorológico Nacional y del Instituto Costarricense de Electricidad, específicamente los datos correspondientes a las estaciones del Cuadro 1. La Figura 3 muestra la ubicación de estaciones en el área de estudio y sus alrededores; la ubicación de la estación La Fortuna se da fuera el área del mapa de esta figura.

Cuadro 1: Estaciones meteorológicas en el área de estudio y alrededores.

Estación	Código	Institución	Coordenadas CRTM05		Elevación (msnm)
			Este	Norte	
La Fortuna	69540	IMN	429060	1157280	250
Los Ensayos	69511	IMN	447277	1138810	1090
Santa Clara	69579	IMN	443635	1144350	160
La Marina	69530	ICE	458239	1146170	380
C. Rural Metodista	69535	IMN	456412	1144330	600
Los Llanos	69513	IMN	461901	1157220	100
Muelle de San Carlos	69554	IMN	449109	1157237	60

4.1.1 Precipitación

De las estaciones enlistadas en el Cuadro 1, seis de las mismas poseen datos de precipitación. El periodo de tiempo que comprende el registro de datos es muy variado en cada una ellas, sin embargo realizando un complejo proceso de completado de datos, se logró contar con información para el periodo de 1958 – 1992. La Figura 4 muestra la distribución mensual de los datos consignados en el Cuadro 2.

Como se observa en el gráfico de la Figura 4, en el área de estudio se muestran dos estaciones del año bien determinadas. La estación seca se da en los primeros tres meses del año (enero a marzo); la estación lluviosa se da en los meses de mayo a noviembre, registrándose las mayores precipitaciones en el mes de julio. Diciembre y abril corresponderían con meses de transición; el primero corresponde a la transición de la estación lluviosa a la estación seca, mientras que el segundo corresponde la transición de la estación seca a la estación lluviosa.

La mayoría de las estaciones no registran precipitaciones con magnitudes superiores a los 490 mm, sin embargo, la estación Centro Rural Metodista muestra claramente ser la que registra las mayores magnitudes de precipitación en el área de estudio, registrándose promedios que alcanzan los 597 mm.

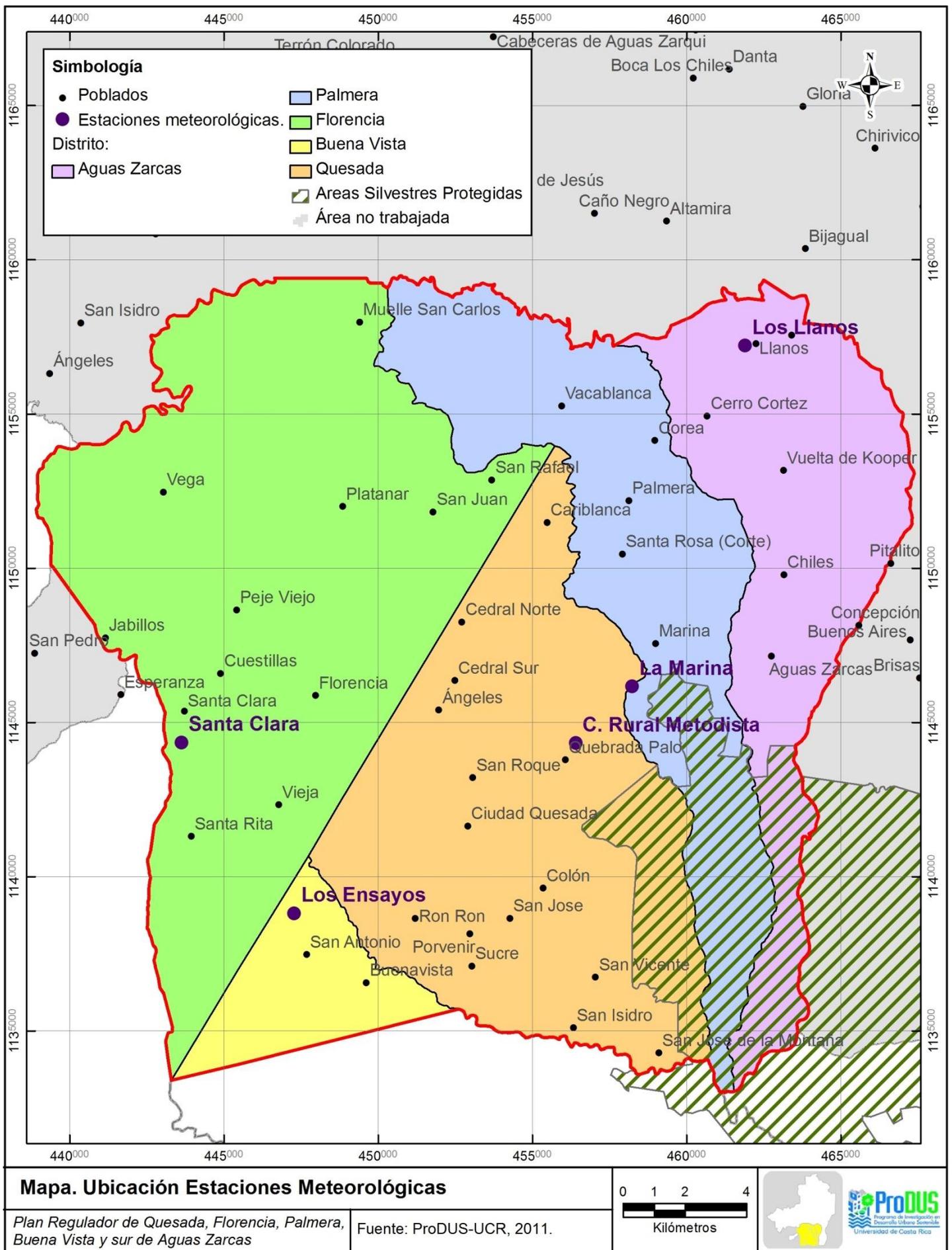


Figura 3: Estaciones meteorológicas en el área de estudio y alrededores. Fuente: ProDUS (2011).

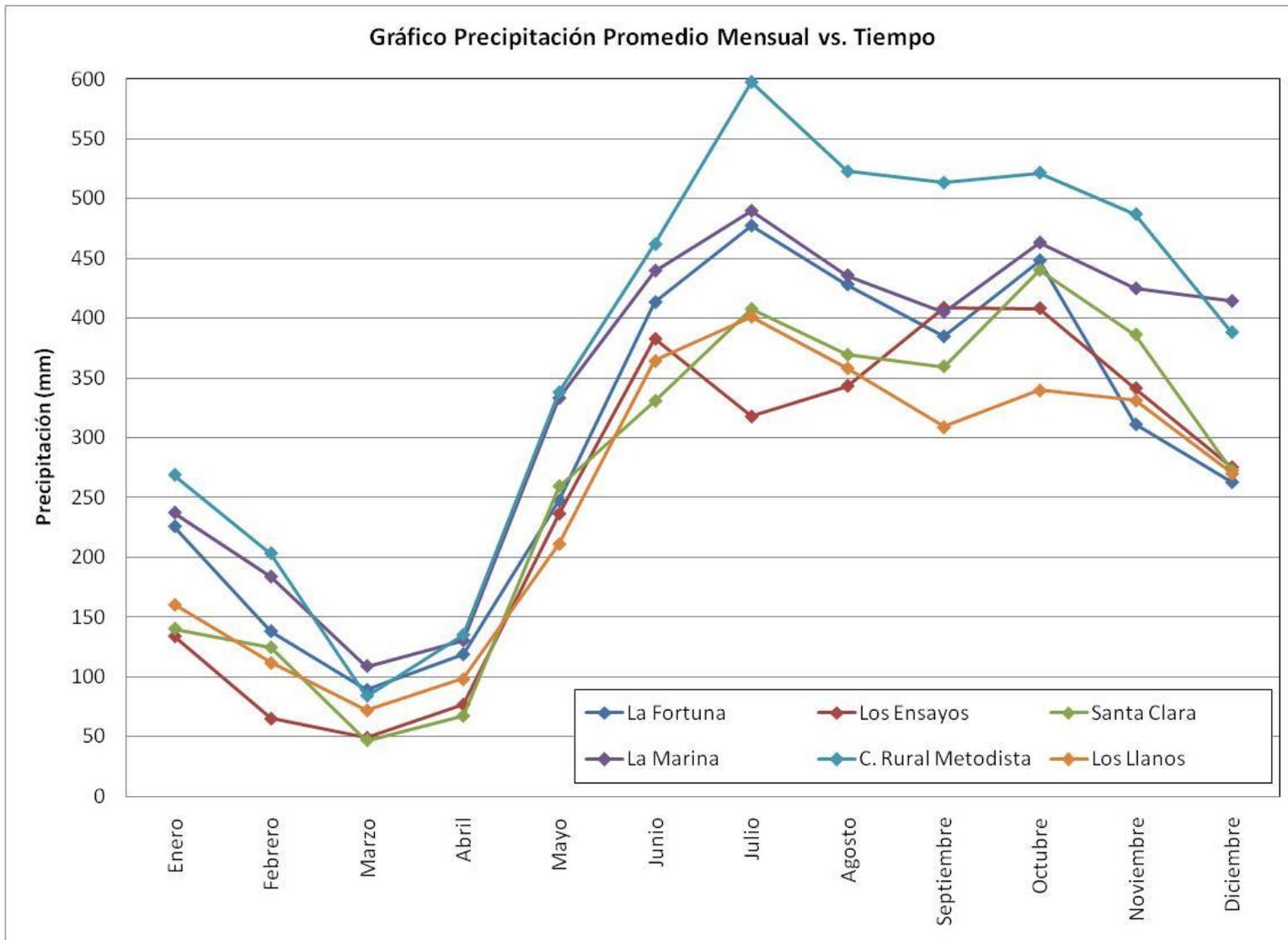


Figura 4. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2011) e ICE (2011).

4.1.2 Temperatura

De las estaciones enlistadas en el Cuadro 1, 5 poseen datos de temperatura. Las estaciones La Marina y Muelle de San Carlos no registran datos de temperatura.

Como se observa en el gráfico de la Figura 5, la magnitud de la temperatura en el área de estudio muestra una clara relación con la altitud en la cual se ubican las estaciones (Cuadro 3), de forma tal que la magnitudes más altas se registran hacia el sector en el que se ubica la estación Los Llanos (100 m.s.n.m.); por su parte, las magnitudes más bajas se registran en la estación Los Ensayos (1.090 m.s.n.m.).

Esta relación directa altitud – temperatura permite que en el área de estudio las variaciones en la temperatura promedio sean muy marcadas, donde la temperatura promedio más alta registrada es de 26,8 °C y la temperatura promedio más baja registrada es de 18,7 °C.

En el área de estudio se muestran dos épocas del año en las que las precipitaciones alcanzan las magnitudes más altas. La primera de ellas se da en el mes de mayo; la segunda época se da en los meses de setiembre y octubre.

4.1.3 Brillo Solar

En el área de estudio, el brillo solar solamente ha sido registrado en 3 de las estaciones enlistadas en el Cuadro 1. El periodo de tiempo que comprende el registro de datos es muy variado en cada una ellas, variando de 4 años (Estación Muelle de San Carlos) hasta registros de 22 años (Estación Santa Clara). La Figura 6 muestra la distribución mensual de los datos consignados en el Cuadro 4.

A partir de la Figura 6 es factible notar un comportamiento en el cual, las magnitudes de este parámetro tienden a ser relativamente mayores hacia el mes de marzo. En los meses de abril a octubre (incluso noviembre), da un marcado descenso en los valores de este parámetro.

El brillo solar promedio más alto registrado, muestra una magnitud de 7,3 horas (estación Muelle de San Carlos), mientras que el valor mínimo registrado es de 2,5 horas (estación La Fortuna).

4.1.4 Humedad relativa

La humedad relativa fue registrada tan registrada tan solo en la estación Muelle de San Carlos, en la cual, la magnitud de este parámetros muestra un rango de variación muy pequeño. El valor promedio mínimo registrado es de 76% en el mes de marzo, mientras que el valor promedio máximo registrado es de 88% en el mes de julio.

Ambos valores son coincidentes con el gráfico de la Figura 4, en los niveles menores de precipitación se esperan en el mes de marzo, en tanto que los valores máximos se han registrado en el mes de julio.

El Cuadro 5 muestra los valores registrados para este parámetro.

Cuadro 2: Precipitación promedio mensual registrada en el área de estudio y sus alrededores.

Estación	Número	Latitud	Longitud	Altitud	Periodo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
La Fortuna	69540	1157280	429060	250	1971 - 1986	226	138	89	119	247	413	477	428	385	448	311	263	3544
Los Ensayos	69511	1138810	447277	1090	1942 - 1986	134	65	49	77	236	383	318	343	409	408	341	275	3038
Santa Clara	69579	1144350	443635	160	1973 - 1985	140	124	47	67	259	331	408	369	360	440	386	273	3204
La Marina	69530	1146170	458239	380	1940 - 1985	237	184	109	130	333	440	490	436	405	463	425	414	4066
Centro Rural Metodista	69535	1144330	456412	600	1972 - 1985	269	203	84	135	338	462	597	523	513	522	487	388	4520
Los Llanos	69513	1157220	461901	100	1958 - 1985	161	112	72	98	212	365	402	358	309	340	331	270	3030

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2011) e ICE (2011)

Cuadro 3: Temperatura promedio mensual registrada en el área de estudio y sus alrededores.

Estación	Número	Latitud	Longitud	Altitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Los Llanos	69513	1157220	461901	100	25,1	25,1	25,8	26,2	26,8	26,5	25,9	26,1	26,3	26,6	25,9	25,0
La Fortuna	69540	1157280	429060	250	24,2	24,5	25,5	26,0	26,4	25,9	25,2	25,5	25,8	25,4	25,4	24,6
Centro Rural Metodista	69535	1144330	456412	600	21,2	21,5	22,0	22,9	23,5	23,2	22,9	22,9	23,0	22,8	22,3	21,4
Los Ensayos	69511	1138810	447277	1090	18,7	19,0	19,7	20,4	21,0	21,0	20,1	20,0	20,1	20,1	19,6	18,9
Santa Clara	69579	1144350	443635	160	24,4	24,7	25,3	25,9	26,4	26,0	25,8	25,7	25,9	25,8	25,0	24,5

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2010) e ICE (2011)

Cuadro 4: Brillo solar promedio mensual registrado en el área de estudio y sus alrededores.

Estación	Número	Latitud	Longitud	Altitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
La Fortuna	69540	1157280	429060	250	5,1	6,1	7,3	6,4	5,2	3,9	3,7	3,1	4,7	3,7	4,4	4,8
Muelle de San Carlos	69554	1157237	449109	60	5,1	5,8	5,9	5,5	3,9	3,3	2,9	3,2	3,8	3,4	3,2	3,8
Santa Clara	69579	1144350	443635	160	3,5	3,8	4,0	3,8	4,5	3,3	3,8	3,6	3,8	3,2	2,7	2,5

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2011) e ICE (2011).

Cuadro 5: Humedad promedio mensual registrada en el área de estudio y sus alrededores.

Estación	Número	Latitud	Longitud	Altitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Muelle de San Carlos	69554	1157237	449109	60	83	78	76	77	84	87	88	87	86	86	87	86

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2011) e ICE (2011).

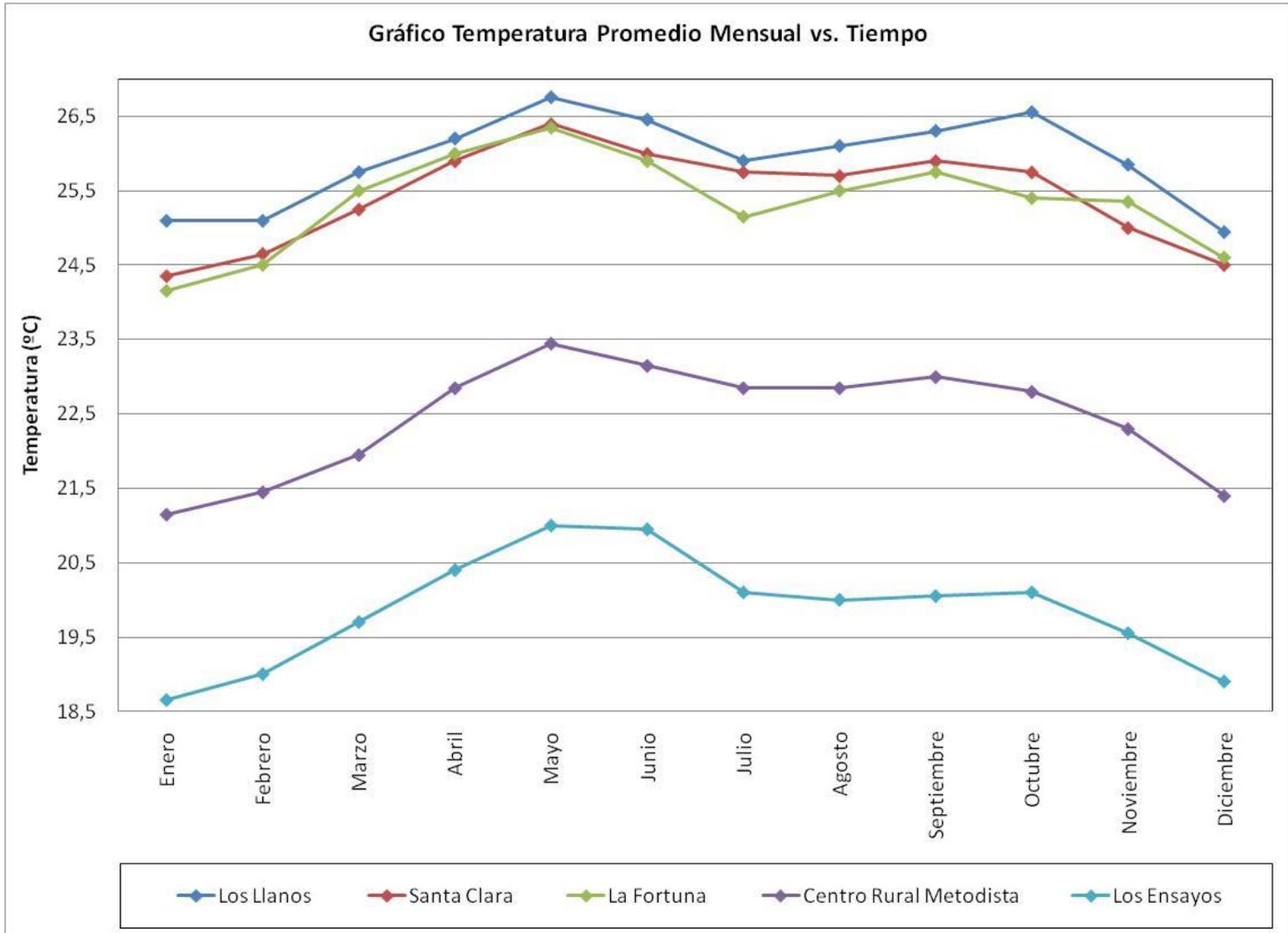


Figura 5. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2011) e ICE (2011).

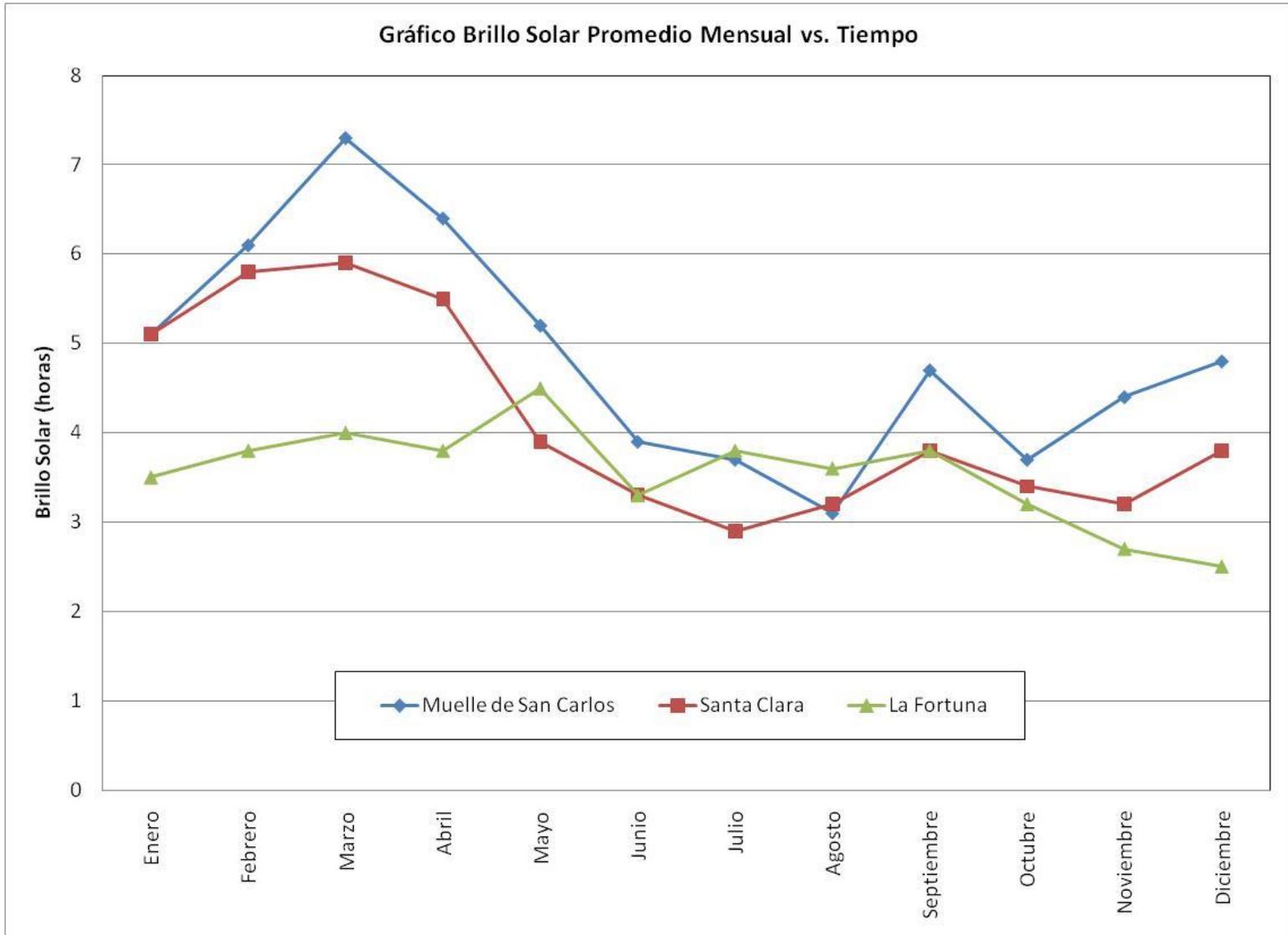


Figura 6. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2011) e ICE (2011).

4.2 Balance Hídrico de Suelos y recarga potencial

El balance hídrico de suelos se realizó siguiendo la metodología propuesta por Schosinsky & Losilla (2000) y Schosinsky (2006), cuyo objetivo principal es evaluar la infiltración de lluvia que penetra al suelo en cada cuenca. Para ello es indispensable contar con la siguiente información: precipitación (Figura 7), fracción de lluvia interceptada por el follaje, fracción de lluvia que infiltra en el suelo, evapotranspiración potencial, la cobertura vegetal del suelo (uso de suelo), la profundidad de las raíces extractoras del agua, la capacidad de campo, el punto de marchitez del suelo, densidad aparente del suelo y la pendiente del terreno.

La fracción de lluvia interceptada por follaje se asume en un 20% para la zona boscosa y de un 12 % en el resto de las áreas; precipitaciones mensuales inferiores a 5 mm se consideran que no infiltran ni escurren (Schosinsky & Losilla, 2000).

El mapa de la Figura 8, muestra la magnitud de la precipitación interceptada en el área de estudio. De acuerdo con lo anterior la precipitación efectiva mensual queda determinada por la siguiente expresión:

$$P_e = 0,88 * C_i * P$$

Donde:

- P_e = Precipitación efectiva mensual en mm
- P = Precipitación media mensual en mm
- C_i = Coeficiente de infiltración

$$C_i = k_{fc} + k_v + k_p$$

k_v (Figura 13) y k_p (Figura 9) son factores que dependen de la cobertura vegetal y la pendiente de la cuenca respectivamente, asumiendo valores cada uno de ellos en función de los criterios expuestos en el Cuadro 6. El factor de vegetación k_v se ha determinado tomando en cuenta la información del mapa de uso del suelo de la Figura 11.

Cuadro 6: Componentes del coeficiente de infiltración (SCHOSINSKY & LOSILLA, 2000)

DESCRIPCIÓN	C_i
Por textura de suelo, k_{fc}:	
Arcilla compacta impermeable	0,10
Por combinación de limo y arcilla	0,20
Suelo limo-arenoso no muy compacto	0,40
Por pendiente, k_p:	
Muy plana 0,02 – 0,06 %	0,03
Plana 0,3 – 0,4 %	0,20
Algo plana 1 – 2 %	0,15
Promedio 2 – 7 %	0,10
Fuerte > 7 %	0,06
Por cobertura vegetal, k_v:	
Cobertura con zacate < 50 %	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18

DESCRIPCIÓN	C _i
Bosques	0,20
Cobertura con zacate > 75 %	0,21

k_{fc} corresponde al factor de capacidad de infiltración “fc” (mm / día), el cual se calcula a partir de la siguiente ecuación: (Figura 10)

$$k_{fc} = 0,267 * \ln (fc) - 0,000154 * fc - 0,723$$

La ecuación anterior es válida para valores de fc entre 16 y 1568 mm / día. Schosinsky (2006) indica que si fc es mayor de 1568 mm / día, entonces $k_{fc} = 1$; si fc es menor de 16 mm / día, se tiene entonces que:

$$k_{fc} = 0,0148 fc/16$$

Los datos fueron procesados mediante el uso de un software que permite trabajar la información mediante un sistema de información geográfico (SIG). Este sistema permitió dividir el área de estudio en celdas discretas de 100 m² (10 m x 10 m), y esto a su vez, permitió realizar los cálculos de los distintos parámetros involucrados con un alto grado de detalle. El método de Schosinsky & Losilla (2000) se aplicó en el mismo SIG, utilizando la herramienta “Algebra de Mapas”.

4.2.1 Uso actual del suelo

El Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, realizó el levantamiento del uso actual del suelo a lo extenso del área de estudio.

La Figura 11 muestra el mapa de uso del suelo realizado por ProDUS para el área de estudio.

Como se indica en el Cuadro 7 y en el gráfico de la Figura 12, el área de estudio muestra una extensa cobertura de pastos y árboles dispersos (46,69 %). Los bosques cubren un 33,12 % del área de estudio; el área cubierta por cultivos representa un 15,01 %; las zonas urbanas representan un 3,76 % y los cuerpos de agua el 1,43 %.

Cuadro 7: Área cubierta por las distintas categorías de uso de suelo.

Uso	Área km ²	Porcentaje (%)
Bosque	185,663	33,12
Pastos y árboles dispersos	261,776	46,69
Cultivos	84,153	15,01
Urbano	21,057	3,76
Cuerpos de agua	7,998	1,43

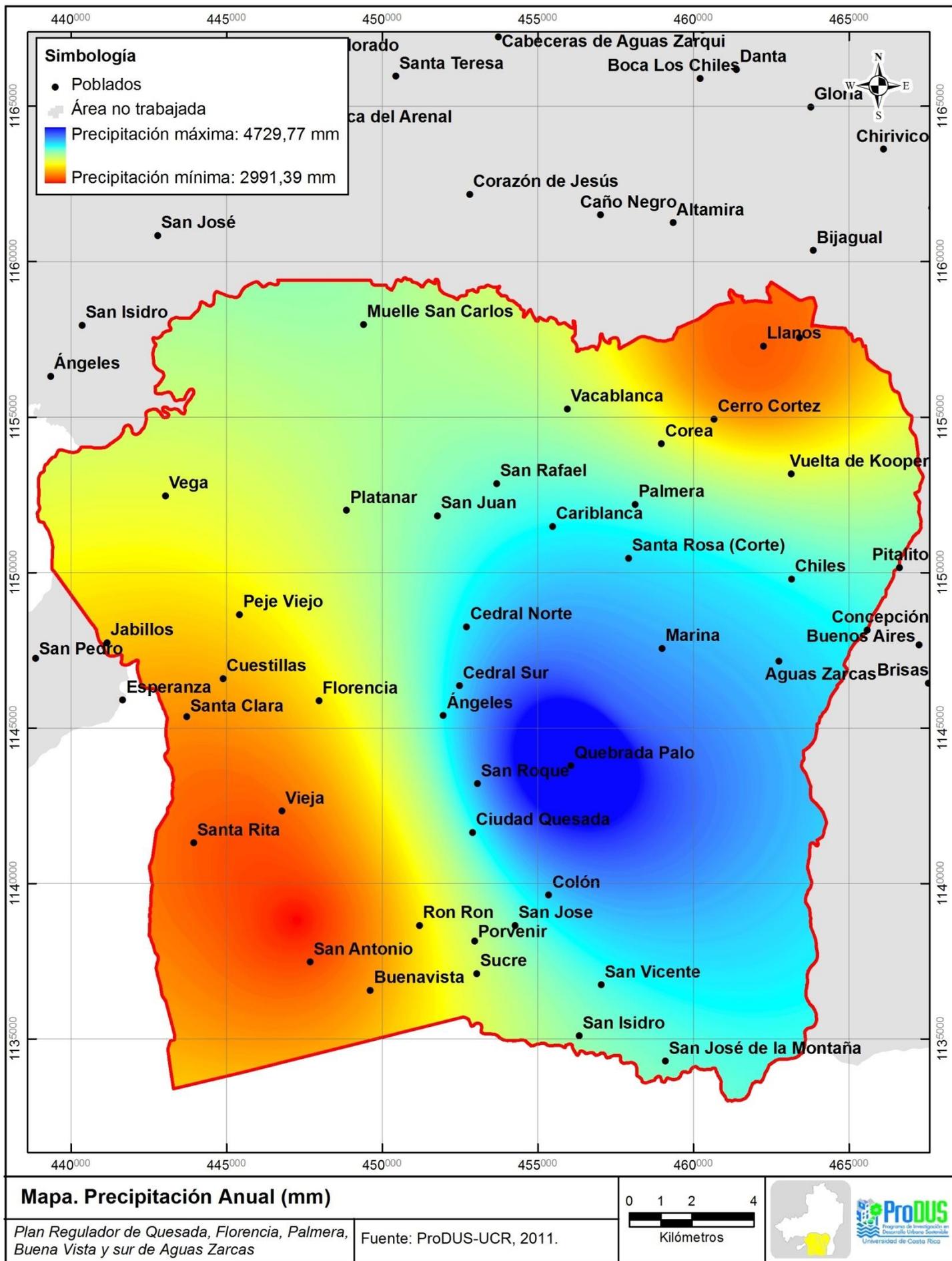


Figura 7: Precipitación total anual en el área de estudio. Tomado y modificado de ProDUS (2011).

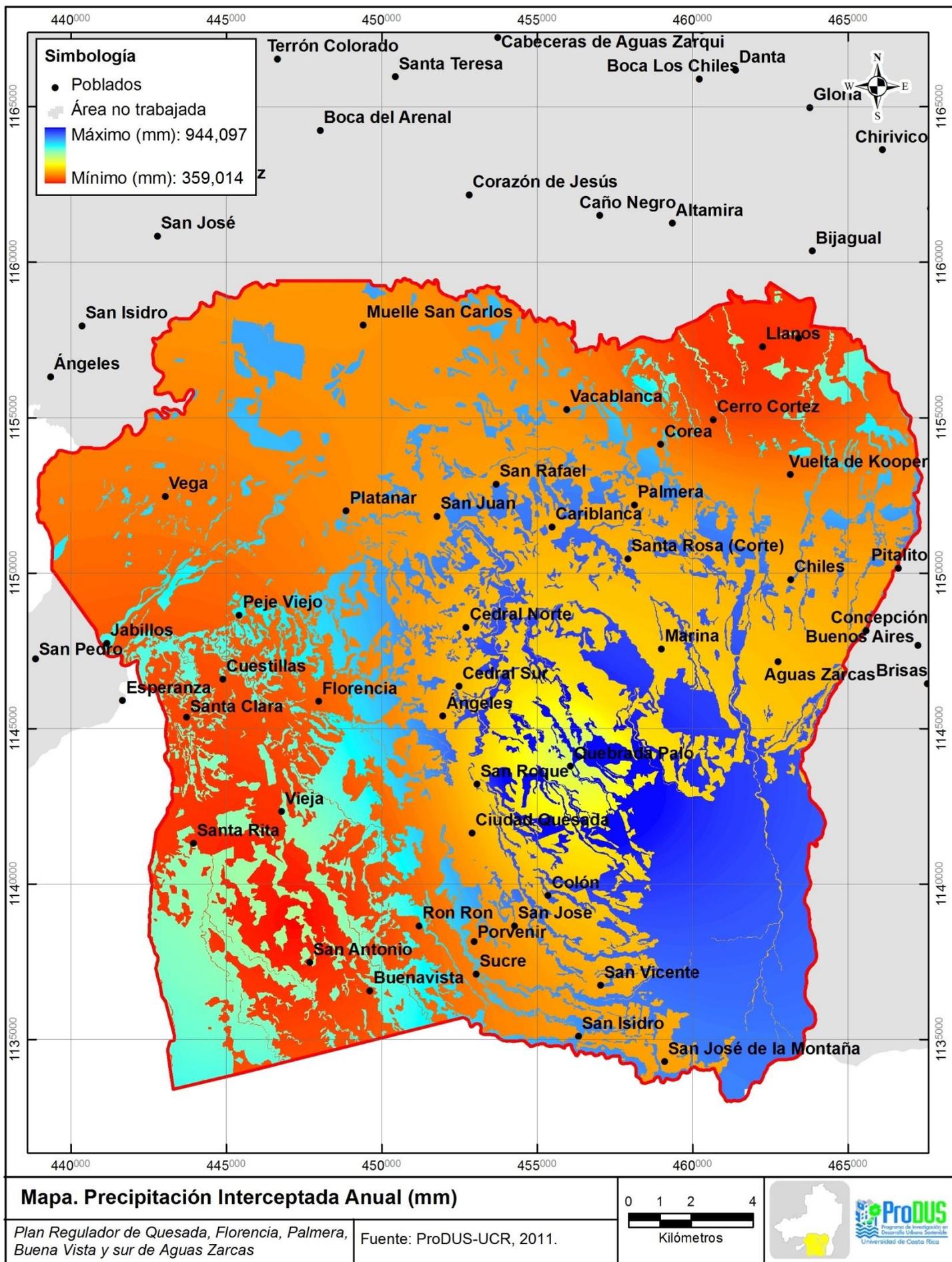


Figura 8: Precipitación interceptada en el área de estudio.

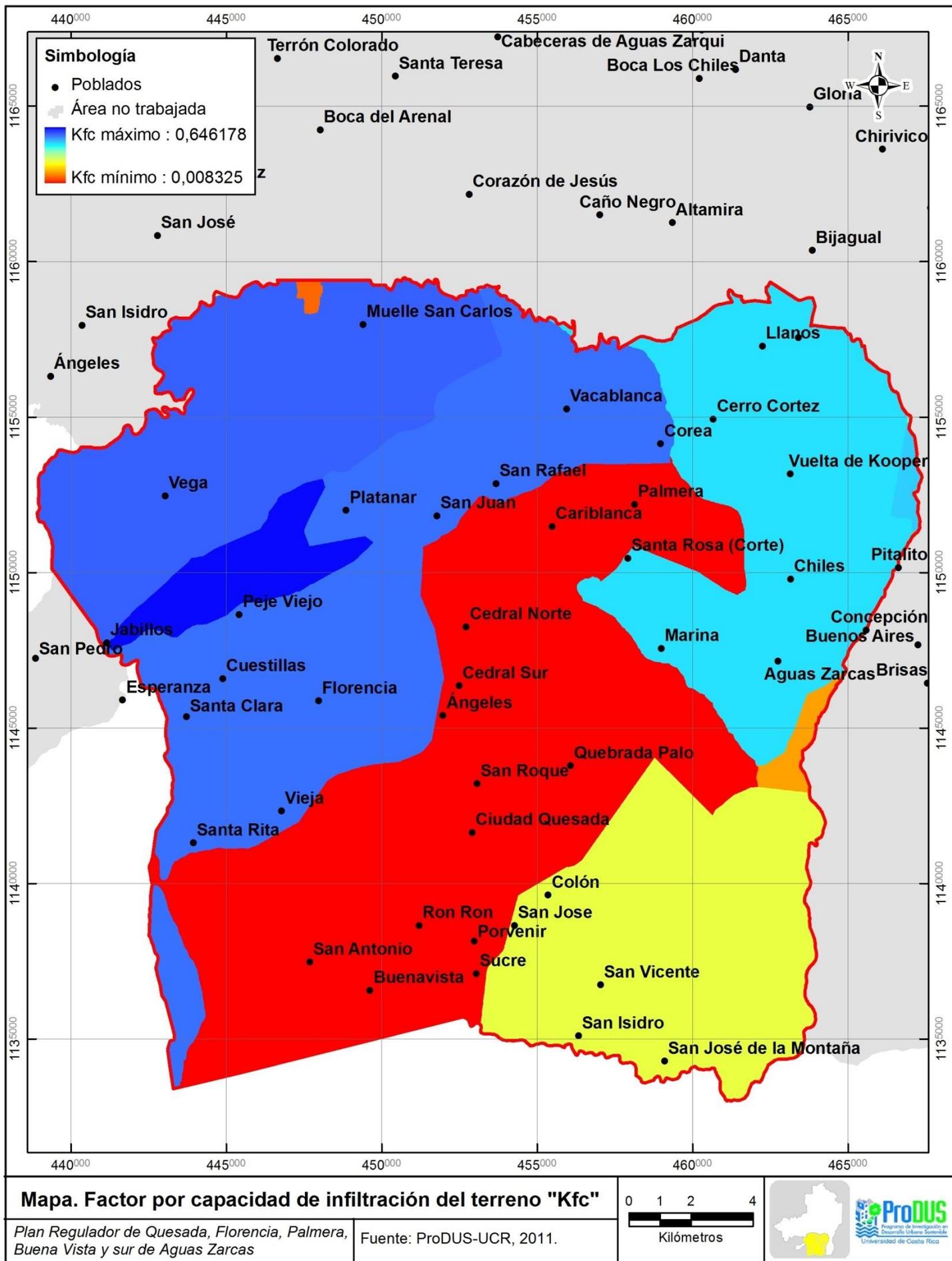
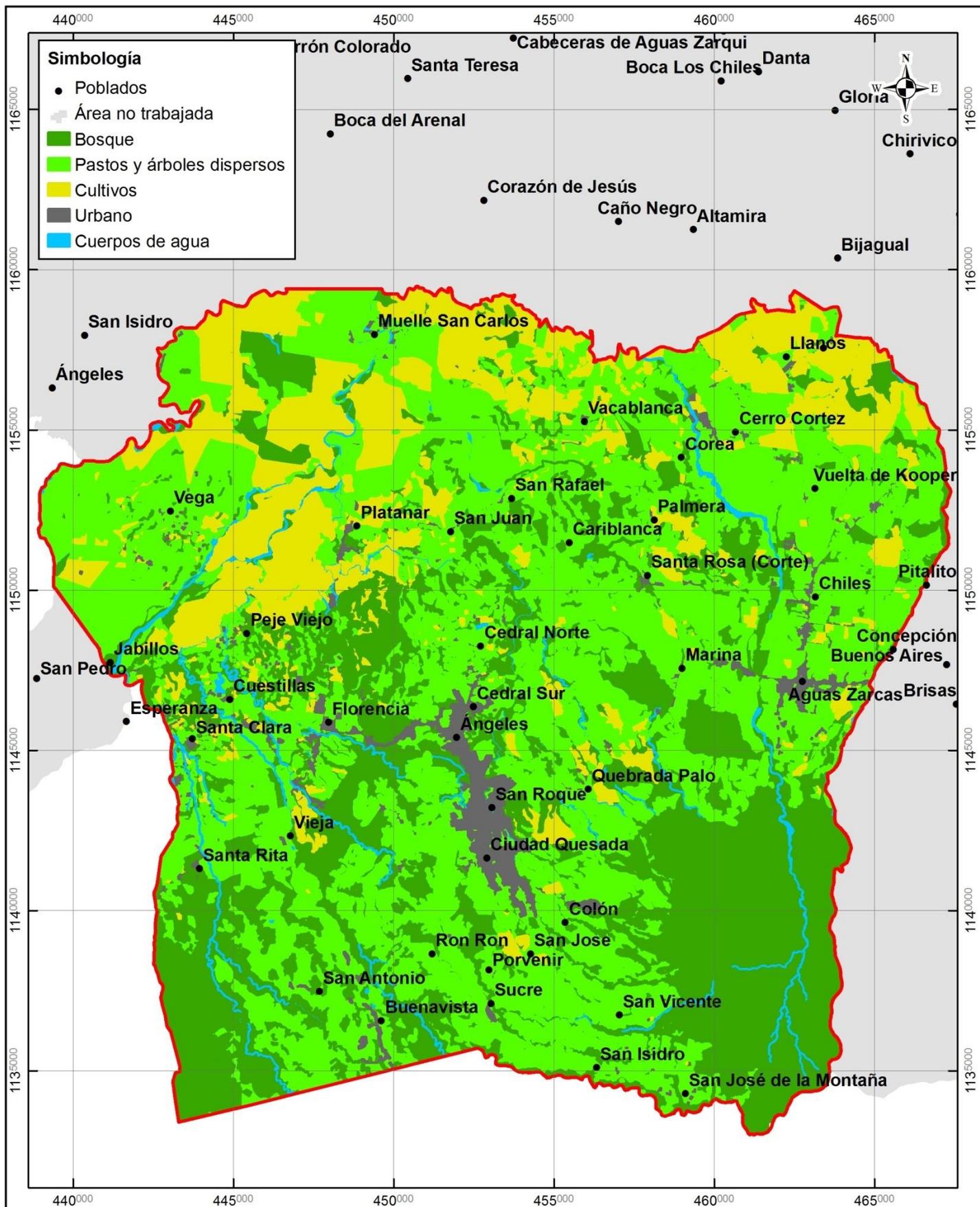


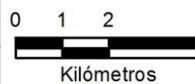
Figura 10: Factor de capacidad de infiltración para el área de estudio.



Mapa. Factor por capacidad de infiltración del terreno "Kfc"

Plan Regulador de Quesada, Florencia, Palmera, Buena Vista y sur de Aguas Zarcas

Fuente: ProDUS-UCR, 2011.



ProDUS
Programa de Investigación
Desarrollo Urbano Sostenible
Universidad de Costa Rica

Figura 11: Mapa del uso de suelo en el área de estudio. Fuente: ProDUS (2011).

Estas categorías de uso del suelo serán utilizadas como insumo para la identificación de las zonas de recarga. Para estos efectos, el método de Schosinsky & Losilla (2000), propone las siguientes categorías de uso del suelo:

- **Bosque:** Representa las áreas en donde prevalece una alta densidad de vegetación y donde prácticamente no se ha dado la intervención de alguna actividad humana.
- **Cultivos:** Son áreas en donde se han presentado cultivos; son zonas en donde ha habido un uso intensivo de la tierra y cuyo propósito son fines comerciales.
- **Urbano:** Corresponde a aquellas zonas en donde se han establecido pequeños núcleos de población y en donde la densidad de la misma es relativamente importante.
- **Pasto:** Se trata de vegetación con predominio de especies pioneras, con algunos árboles remanentes de las actividades anteriores o del bosque original. En su lugar la vegetación existente se refiere a pequeños arbustos, maleza y pasto. Estas áreas no son explotadas en relación a algún tipo de cultivo.

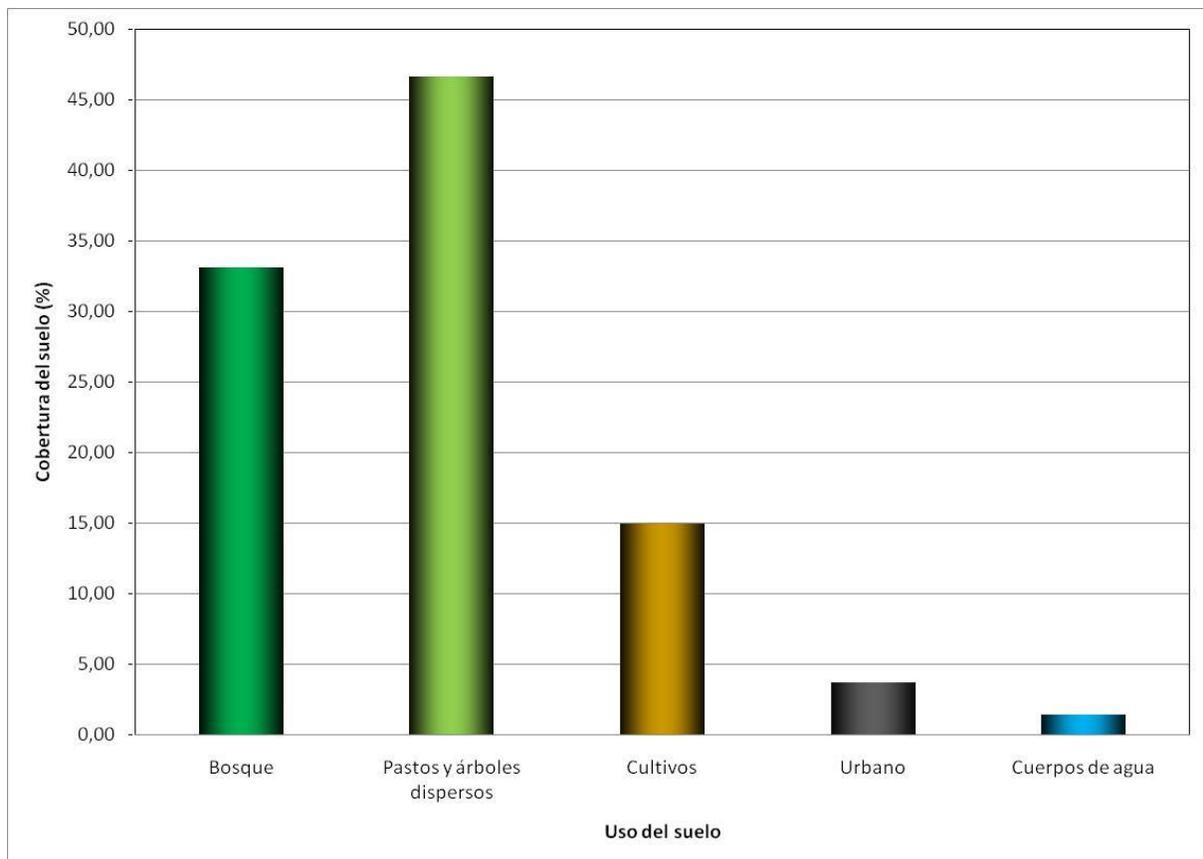


Figura 12: Distribución del uso del suelo en el área de estudio.

Finalmente, a partir de la zonificación del área de estudio en función del uso del suelo, se plantea el mapa del factor de vegetación “Kv” para el área de estudio (Figura 13), siguiendo lo expuesto por el método de Schosinsky & Losilla (2000).

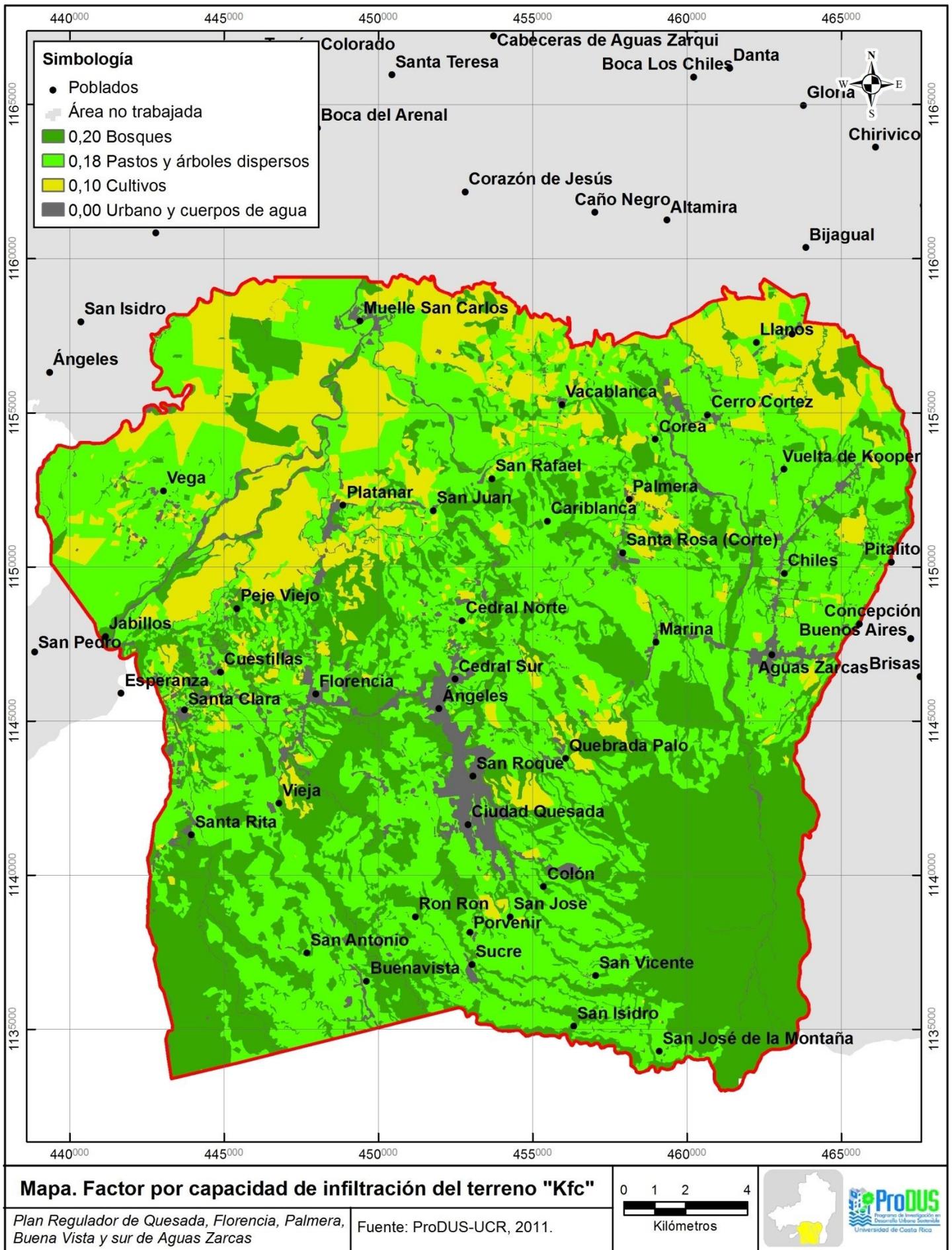


Figura 13: Factor de vegetación para el área de estudio.

4.2.2 Infiltración, punto de marchites y capacidad de campo

Estos parámetros fueron obtenidos a partir de información secundaria, específicamente del Mapa de Clasificación de Uso Potencial del Suelo, elaborado por el MAG a escala 1:200.000.

4.2.3 Evapotranspiración

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial en el área de estudio, se requieren datos de temperatura a lo extenso del área de estudio.

Como se observa en la Figura 5 y en el Cuadro 3, para el área de estudio y sus alrededores es muy evidente la relación directa que existe entre la temperatura y la altitud del terreno. Basándose en este hecho, se ha realizado una estimación de la temperatura mensual a partir de la altitud del terreno y registros de temperatura de estaciones cercanas a la zona de estudio. Para lograr esto, se realizó un gráfico por mes de temperatura vs. altitud para el área de estudio. La información utilizada corresponde a los resúmenes de los registros de las estaciones meteorológicas más cercanas a cada una de las cuencas mencionadas.

Una vez elaborado cada gráfico, se realizó una regresión lineal de los datos, obteniendo así una curva de mejor ajuste para cada mes en cada cuenca. Los coeficientes de correlación al cuadrado para cada curva tienen un valor de 0,9649 a 0,9986. Las ecuaciones que describen las curvas de mejor ajuste obtenidas, se utilizaron para el cálculo de temperatura en función de la altitud.

La Figura 14 muestra la distribución espacial de la temperatura promedio anual para el área de estudio.

Habiéndose generado los mapas de temperatura mensual, se calculó a partir de ellos la evapotranspiración potencial, utilizando para ello el método de Holdridge, el cual fue utilizado por ProDUS de la Universidad de Costa Rica para los cálculos preliminares que ha realizado de este parámetro. Se utilizó este método con el fin de mantener la uniformidad en la información y métodos a partir de los cuales se obtendrán los resultados. De esta forma, los resultados que se obtengan guardarán coherencia y servirán realmente de complemento a los demás proyectos en ejecución dentro de la Cuenca Alta del río Reventazón.

Según el método de Holdridge, la evapotranspiración potencial se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$EVTP = 58,93 * T (^{\circ}C) * \text{días}/365$$

EVTP: evapotranspiración potencial.

T: temperatura media mensual.

Días: número total de días de cada mes.

La Figura 15 muestra la distribución espacial de los valores de evapotranspiración potencial para el área de estudio.

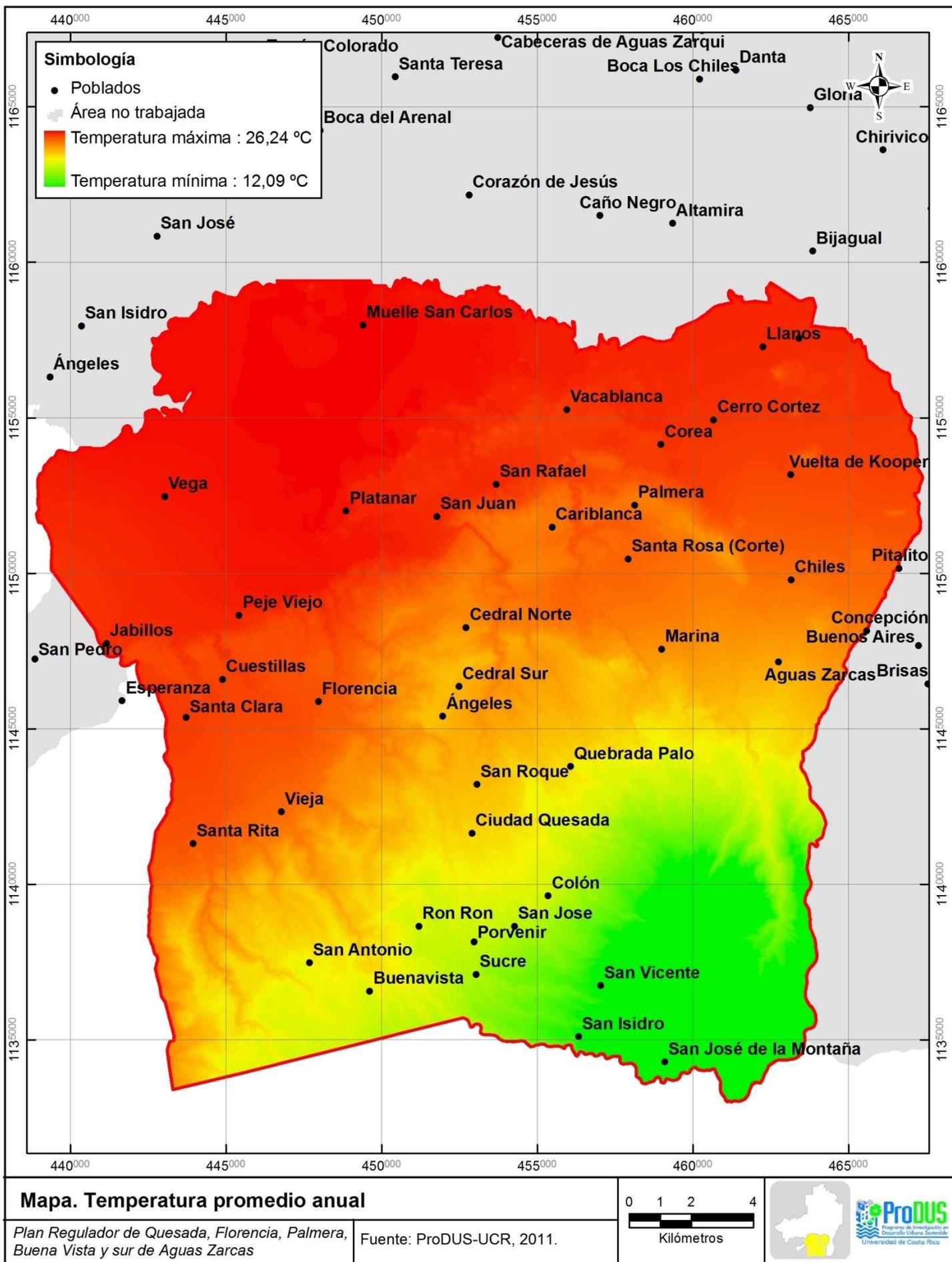


Figura 14: Temperatura promedio anual en el área de estudio.

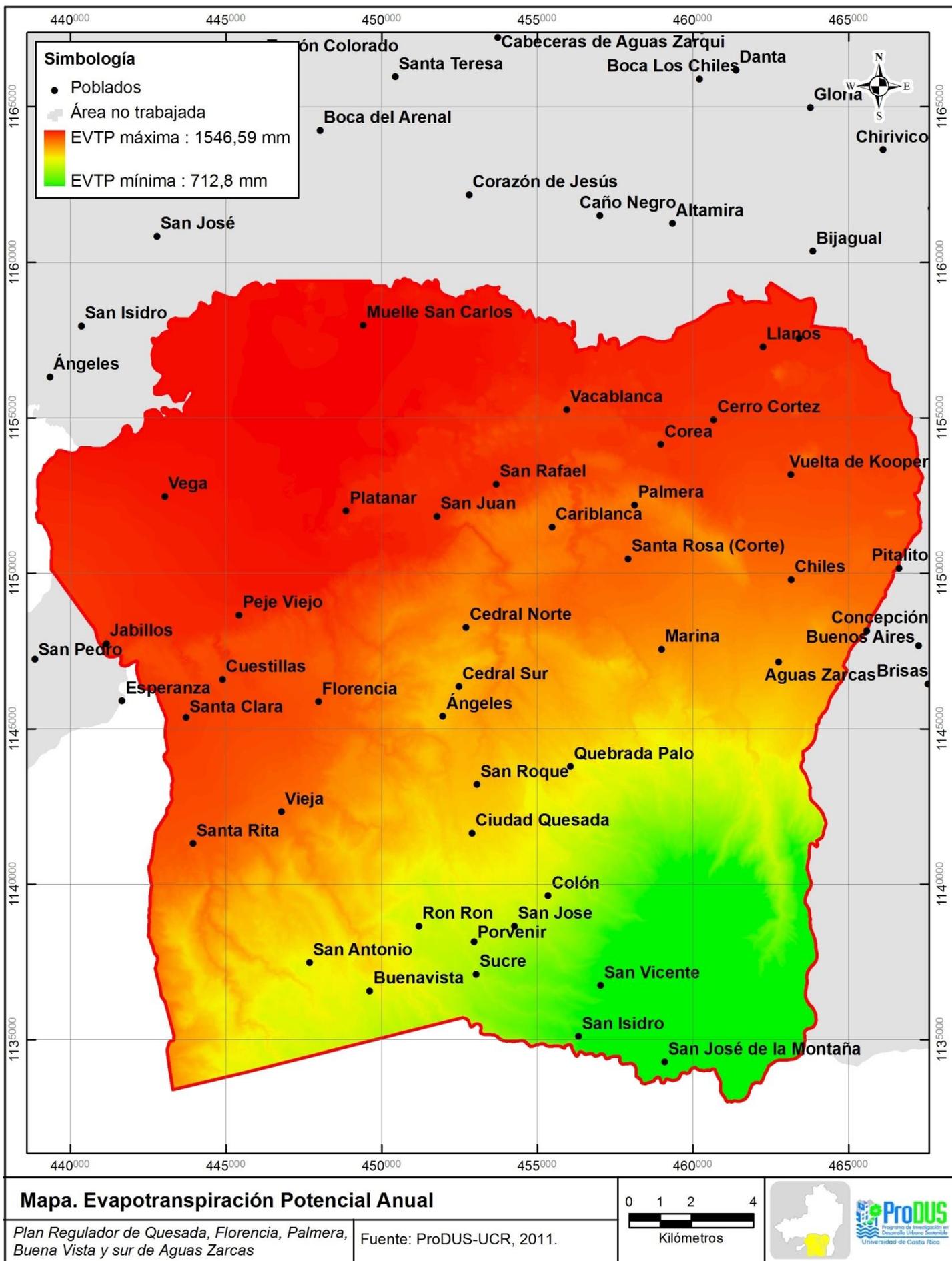


Figura 15: Evapotranspiración potencial anual en el área de estudio según el método de Holdridge.

4.2.4 Recarga potencial en el área de estudio.

Como se mencionó anteriormente, la recarga directa en el área de estudio fue calculada a partir del método planteado por Schosinsky (2006). A partir de su aplicación, se obtiene en primera instancia un valor de infiltración en milímetros por año para cada celda de cálculo.

El mapa de la Figura 16 muestra que la magnitud de la recarga directa presenta un amplio rango de valores, los cuales van desde 0 a 1.910,24 mm / año para cada celda de análisis. La recarga total en m^3 / año se obtiene de multiplicar los valores de recarga del mapa de la Figura 16 por el área de cada celda de análisis (100 m^2). El mapa de la Figura 17 muestra los valores que toma la recarga por cada celda de análisis, los cuales van desde 0 a $191,024 \text{ m}^3$ / año. La recarga total para el área de estudio se obtiene de realizar la sumatoria de la recarga en todas las celdas; el resultado obtenido es $346.875.394 \text{ m}^3$ / año.

En lo que respecta a las zonas de recarga, en la Figura 18 se observa con claridad que las mayores magnitudes de recarga potencial (1.156 mm) se registran hacia las zonas bajas del área de estudio, específicamente aquellas zonas que corresponde con los abanicos aluviales y coluviales. Los poblados más cercanos a estas zonas son Jabillos, Vega y Muelle.

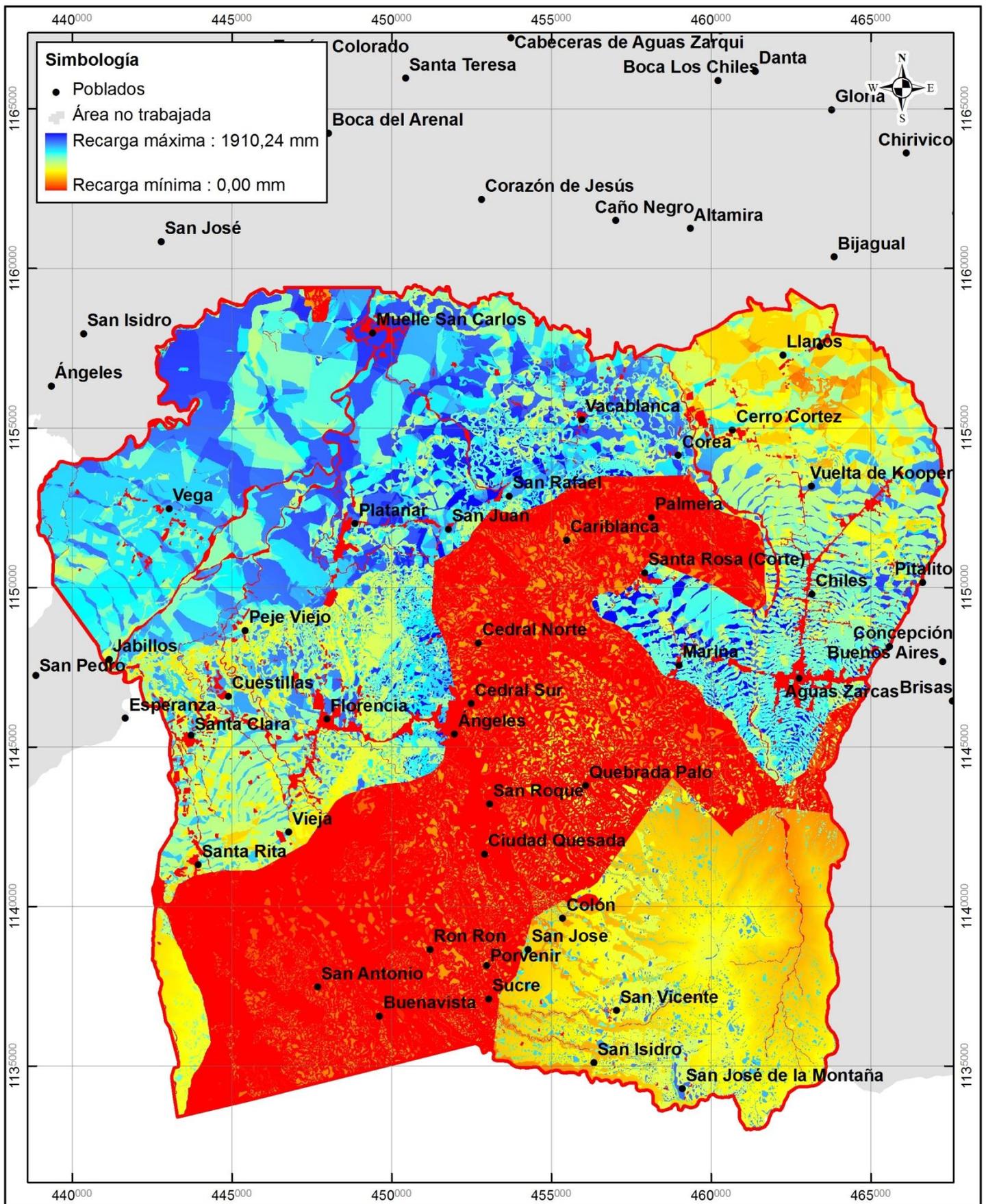
En segundo lugar, se tiene una zona cuya recarga anual promedio es 1.130 mm. Las comunidades que se ubican sobre esta zona son Platanar, San Juna, San Rafael, Corea y Vacablanca.

En tercer lugar, se ubica una zona cuyo promedio de recarga anual es de 937 mm. Dentro de esta zona se ubican los poblados Marina, Aguas Zarcas, Concepción, Chiles, Pitalito y Vuelta de Kooper.

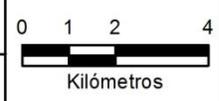
Existen tres zonas que presentan magnitudes intermedias de recarga, las cuales oscilan entre 518 – 750 mm / año. En ellas se ubican las comunidades Santa Rita, Vieja, Santa Clara, Florencia, Cuestillas, Peje Viejo, Cerro Cortez, Llanos, San José de la Montaña, San Isidro y San Vicente.

Finalmente, se tiene una zona cuya recarga potencial promedio es de 49 mm; presenta la mayor extensión en el área de estudio. En ella se ubican las comunidades Buena Vista, Sucre, San Antonio, Porvenir, Ron Ron, Ciudad Quesada, San Roque, Quebrada Palo, Ángeles, Cedral Sur, Cedral Norte, San Rosa, Cariblanca y Palmeral.

En general, las tres primeras zona al presentar la mayor magnitud promedio de recarga potencial, merecen mayor atención, y por consiguiente, la ejecución en ellas de estudio detallados de campo que permitan establecer cuan frágil puede ser el recurso hídrico subterráneo en estas zonas, además de evaluar las alternativas de aprovechamiento racional de este recurso.



Mapa. Recarga Potencial Anual (milímetros)



Plan Regulador de Quesada, Florencia, Palmera, Buena Vista y sur de Aguas Zarcas

Fuente: ProDUS-UCR, 2011.

Figura 16: Recarga directa (mm por año) para el área de estudio.

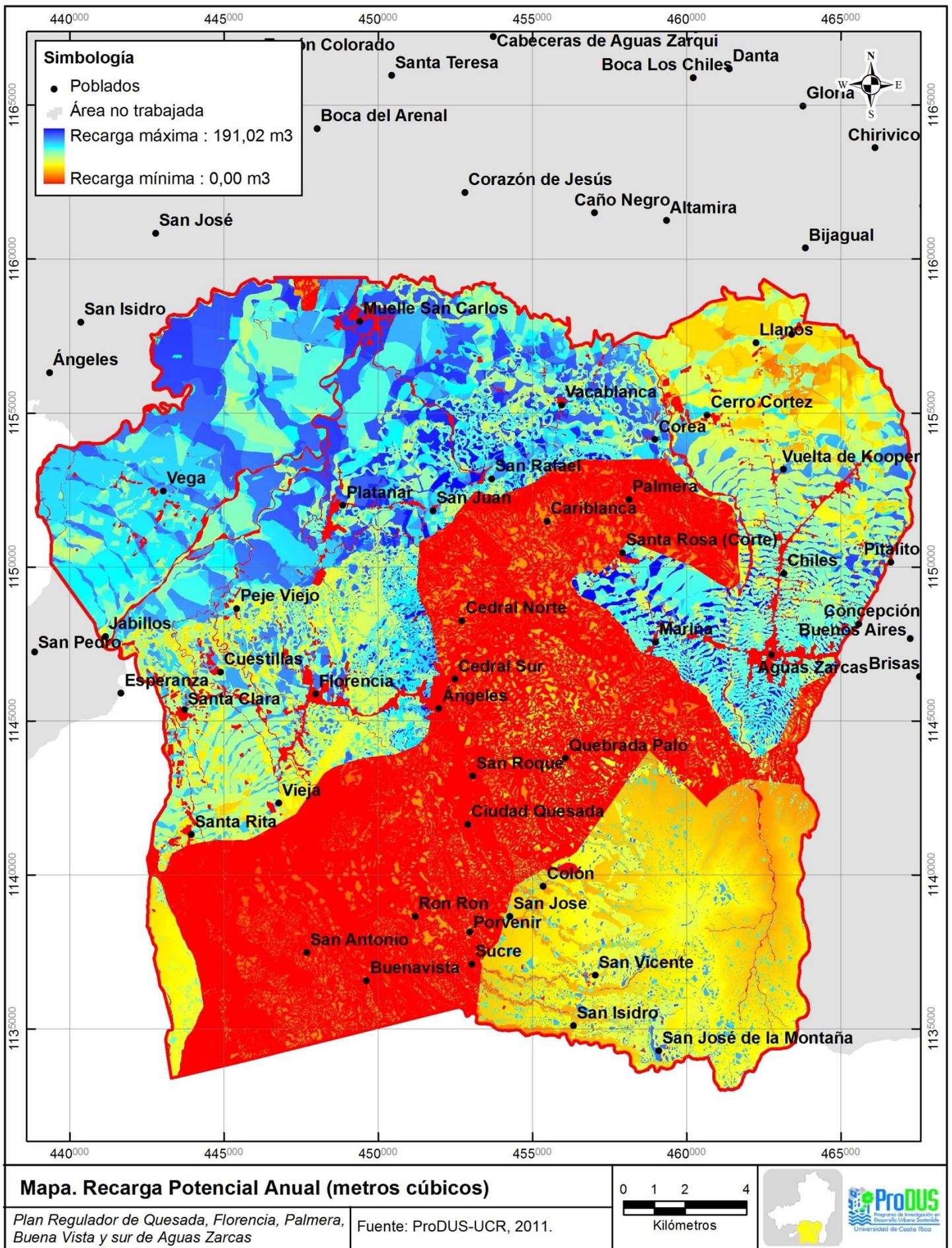


Figura 17: Recarga directa (m³ / año) para cada celda de análisis.

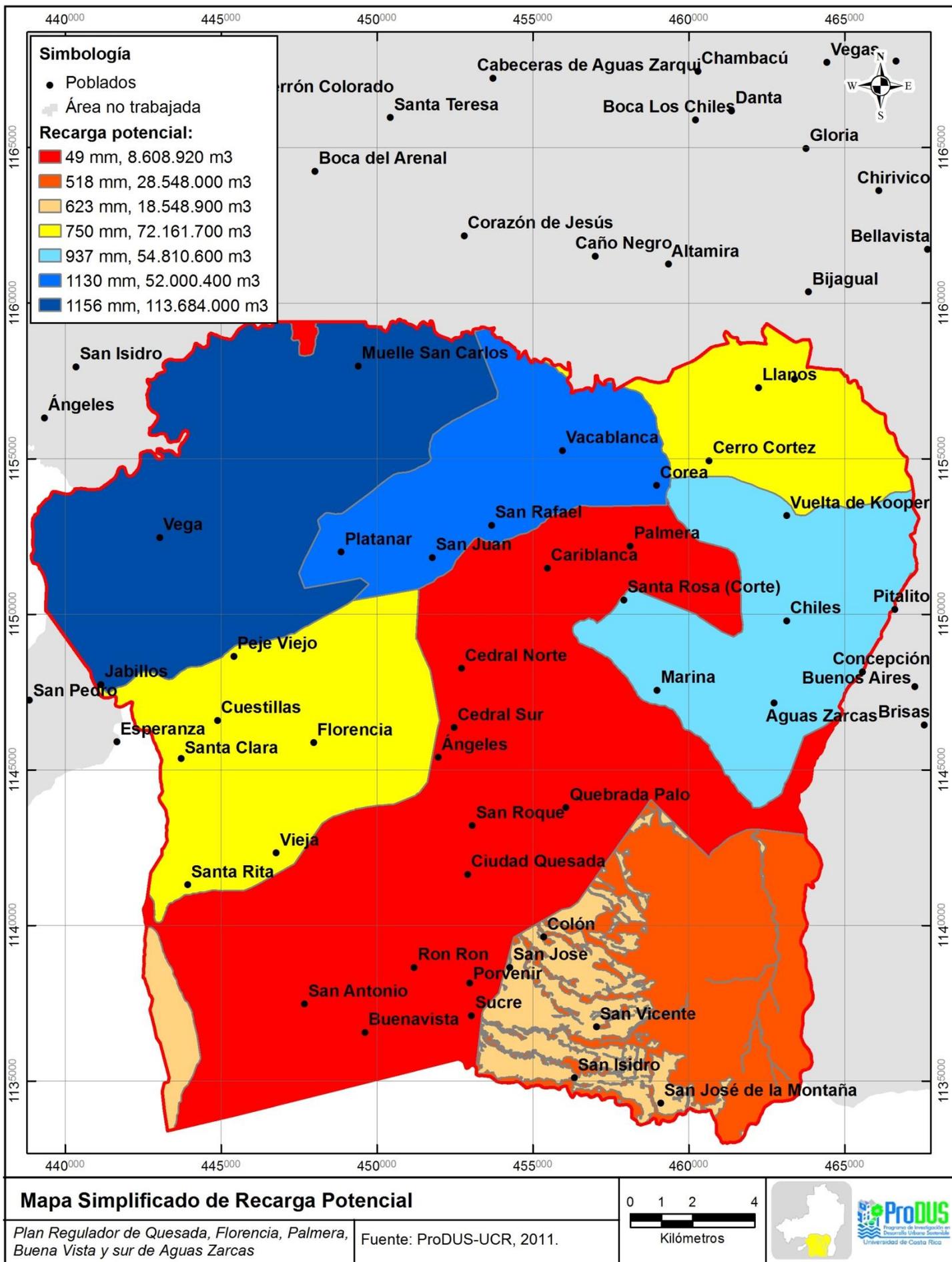


Figura 18: Zonas de recarga directa (mm / año) para el área de estudio.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Hidrogeología del área de estudio

5.1.1 Características y producción de los pozos

Para el área de estudio, se obtuvo la información de pozos que se encuentra registrada en el SENARA (2011) referida al área de estudio. Como se resultado de esta gestión, se obtuvo solamente la información del nivel estático y litología de dos pozos que se encuentran ubicados en el área de estudio. Por consiguiente, en cuanto a pozos, no se cuenta con información suficiente con la cual poder caracterizar de mejor forma los acuíferos que puedan estar presentes en el área de estudio.

Cuadro 8: Características registradas en los pozos dentro del área de estudio.

Pozo	Coordenadas		Propietario	Q (L/s)	Prof. (m)	NE (m.b.n.s.)	ND (m.b.n.s.)	Uso
	X	Y						
AZ-15	453688	1159316	FUNCAR	2,70	43,00	6,00	30,00	DOMESTICO
AZ-14	455948	1144863	ASOC. EVANG. METODISTA	0,60	27,00	8,00	0,00	DOMESTICO
AZ-5	452397	1143867	C.C.S.S.	12,00	130,00	10,15	49,96	ABAST. PÚBLICO
AZ-1	452297	1144167	M.A.G.	0,48	47,24			DOMESTICO
AZ-10	459308	1155260	TICOFRUT, S.A.	5,00	60,00			INDUSTRIAL
AZ-11	454497	1143990	CERVECERIA COSTA RICA,S.A	0,00	41,00			INDUSTRIAL
AZ-12	452550	1156867	FRUTAS Y SABORES HC, S.A.	5,00	50,00			DOMESTICO
AZ-13	453261	1157816	FRUTAS Y SABORES H.C.,S.A	0,00	0,00			INDUSTRIAL
AZ-17	459358	1155010	TICOFRUT, S.A.	12,61	73,00			AGROINDUSTRIAL
AZ-20	459508	1155260	TICOFRUT S.A.	0,00	0,00			INDUSTRIAL
AZ-21	458500	1147311	I.N.A.	1,00	80,00			DOMESTICO
AZ-27	458761	1148680	INMOBILIARIA ULICAR MARINA S.A	3,60	40,00			RIEGO
AZ-28	452372	1143992	C.C.S.S	12,00	135,00			ABAST. PUBLICO
AZ-29	459308	1154860	TICOFRUT S.A.	10,00	141,00			INDUSTRIAL
AZ-3	462659	1156006	ACNUR	2,00	30,00			DOMESTICO
AZ-30	445599	1146024	RIO DE ORQUIDEAS S.A.	2,50	30,00			ABAST. PUBLICO
AZ-35	448843	1152154	LEDA ESPINOZA JIMENEZ	2,00	36,00			DOMEST-RIEGO
AZ-36	447500	1146572	NICOLAZA SEVILLA	2,00	60,00			DOMEST-RIEGO

Pozo	Coordenadas		Propietario	Q (L/s)	Prof. (m)	NE (m.b.n.s.)	ND (m.b.n.s.)	Uso
	X	Y						
			BENAVIDES					
AZ-38	462386	1157932	INDUSTRIA CARTONERA INCA S.A.	2,50	35,00			AGROINDUSTRIAL
AZ-40	448826	1158253	COORP CULANTROS DE COSTA RICA S.A	0,50	30,00			AGROINDUSTRIAL
AZ-42	458761	1148680	INMOBILIARIA ULICAR DE LA MARI	2,80	40,00			INDUSTRIAL
AZ-43	462135	1156567	ASOC.ACUED.S AN JOSE ,CERRO CORTES,LOS LLANOS	12,20	27,00			ABAST. PUBLICO
AZ-44	458020	1146257	BALDI OPERADORA DE TURISMO S.A.	1,00	60,00			DOMESTICO
AZ-47	461187	1154578	GANADERA BRACILIA S.A.	3,00	30,00			AGROINDUSTRIAL
AZ-48	446412	1159051	INDIANITA S.A	3,00	60,00			AGROINDUSTRIAL
AZ-49	464908	1155454	CAYUMARY S.A.	3,00	20,00			INDUSTRIAL
AZ-53	462772	1144806	POLLOS TYSON S.A.	1,30	32,00			AGROINDUSTRIAL
AZ-6	462458	1155407	CAMPO DE REFUGIADOS	0,50	0,00			DOMESTICO
AZ-7	446613	1159223	TICOFRUT, S.A.	5,00	55,00			DOMESTICO
AZ-8	448512	1157871	HDA. JADE, S.A.	8,00	48,00			AGROINDUSTRIAL
AZ-9	459508	1154960	TICOFRUT, S.A.	4,72	60,00			DOMESTICO
CH-8	422006	1219803	AyA	6,00	43,00			ABAST. PUBLICO
FO-1	443489	1145626	COLEGIO AGROPECUARI O	0,50	27,43			DOMESTICO
FO-10	444849	1146075	GONZALO RODRIGUEZ CHAVEZ	0,50	0,00			DOMESTICO
FO-6	444710	1155925	INV. AGROPEC. INCEPA, S.A	1,20	40,00			DOMESTICO
FO-7	443887	1146090	INSTITUTO TECNOLOGICO	6,00	80,00			ABAST. PUBLICO
FO-8	444350	1147225	GONZALO	2,21	40,00			DOMESTICO

Pozo	Coordenadas		Propietario	Q (L/s)	Prof. (m)	NE (m.b.n.s.)	ND (m.b.n.s.)	Uso
	X	Y						
			RODRIGUEZ CHAVEZ					
FO-9	443600	1146406	INSTITUTO TECNOLOGICO	6,00	60,00			ABAST. PUBLICO
IF-11	457942	1186462	AyA	0,25	57,00			ABAST. PUBLICO
IF-13	451053	1196070	COMUNIDAD	9,50	70,00			ABAST. PUBLICO
IF-14	447749	1192873	COMUNIDAD	9,50	61,00			ABAST. PUBLICO
IF-2	457041	1185763	AyA	0,50	50,00			ABAST. PUBLICO
IF-3	457942	1187062	AyA	5,50	90,00			ABAST. PUBLICO
IF-5	457561	1185892	COMUNIDAD	8,00	90,00			ABAST. PUBLICO
MY-4	418350	1168734	GANADERA HEMA S.A.	2,00	50,00			DOMEST-RIEGO
PS-1	448756	1198572	COMUNIDAD	10,00	46,00			ABAST. PUBLICO
QA-9	455741	1138963	ASOC.CIVICA COSTARRICENS E	0,50	11,00			DOMESTICO
AZ-54	453515	1144108	Miraji, S.a.	2,00	70,00			Riego
AZ-55	461734	1157544	Prosanca S.a.	2,50	40,00			Industrial
QA-24	453838	1137670	B Y Jiménez Dos Mil Tres S.a	3,00	70,00			Riego
AZ-58	459448	1155303	Banco Improsa, S.a.	20,00	120,00			Industrial
FO-59	443196	1146126	Fiduciaria De Inversi3n Coocique, S.a.	3,00	40,00			Industrial

El mapa de la Figura 19 muestra la ubicación de estos pozos dentro del área de estudio.

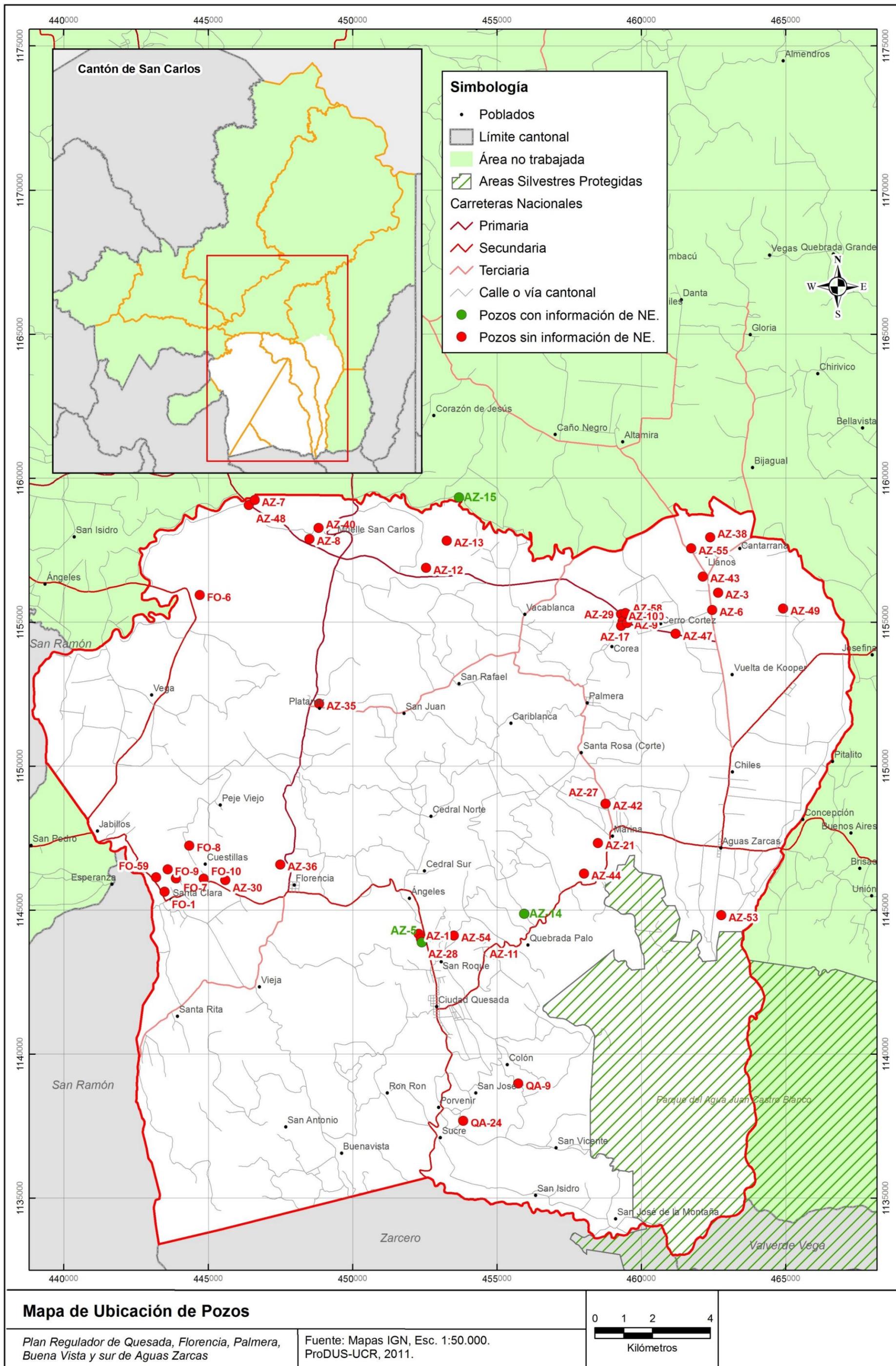


Figura 19: Mapa de ubicación de pozos en el área de estudio. Fuente: SENARA (2011).

Además de los pozos ya mencionados, según los registro la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, en el área estudio se ubican aproximadamente 188 nacientes, las cuales estarían siendo captadas para diversos usos.

Cuadro 9: Manantiales presentes en el área de estudio.

EXPEDIENTE	F2	X_CRTM05	Y_CRTM05	Alt. (m.s.n.m.)	Q (L/s)	ESTADO
7426	A	464051	1148455	428,59	0,20	CANC. X MOR.
8809	A	463352	1149606	315,43	0,50	CANC. X MOR.
6121	A	465202	1149454	291,40	0,20	CANC. X MOR.
6184	A	465302	1149453	290,00	0,02	CANC. X MOR.
7237	A	447901	1148072	192,32	0,35	CANC. X MOR.
8928	A	458407	1153761	150,00	2,12	CANC. X MOR.
11772	A	461048	1145258	583,54	10,00	CANC. X MOR.
5397	A	456841	1138762	1272,08	0,10	CANC. X MOR.
5897	A	458692	1139160	1604,08	0,50	CANC. X MOR.
10235	A	456093	1140063	961,91	0,55	CANC. X MOR.
10636	A	458554	1150871	277,94	0,14	CANC. X MOR.
7395	A	451626	1148168	380,00	0,50	CANC. X MOR.
7794	A	453292	1139166	840,00	4,28	CANC. X MOR.
4035	A	454945	1142064	700,00	0,20	CANC. X MOR.
6994	A	458099	1145961	534,54	8,00	CANC. X MOR.
6986	A	458886	1133960	1840,00	2,00	CANC. X MOR.
2925	A	462698	1145556	620,00	7,00	CANC. X MOR.
8174	A	446094	1140973	388,42	1,25	CANC. X VENC.
8938	A	457849	1146111	553,29	1,00	CANC. X VENC.
6585	A	455309	1155664	105,55	3,00	CANC. X VENC.
8938	A	457929	1145961	549,23	19,70	CANC. X VENC.
6175	A	453698	1144766	510,00	0,02	CANC. X VENC.
7965	A	455692	1139963	913,91	0,13	CANC. X VENC.
8557	A	456192	1139963	940,00	0,15	CANC. X VENC.
5936	A	454943	1140664	794,51	0,17	CANC. X VENC.
2704	A	450896	1143068	562,87	0,12	CANC. X VENC.
886	H	458789	1136460	1818,70	1,50	CANC. X VENC.
886	H	458989	1136560	1830,00	1,50	CANC. X VENC.
4334	A	454993	1140264	810,10	36,29	CANC. X VENC.
8983	A	459187	1135285	1827,97	2,03	CANC. X VENC.
4334	A	454192	1139665	830,08	40,94	CANC. X VENC.
4334	A	455093	1140164	811,78	18,96	CANC. X VENC.
4334	A	454091	1138865	931,31	60,93	CANC. X VENC.
4334	A	453892	1138965	889,02	54,90	CANC. X VENC.
4334	A	453992	1139665	825,04	97,98	CANC. X VENC.
8414	A	461948	1145427	624,04	0,00	CANCELADO
6313	A	462550	1147856	440,00	0,00	CANCELADO

EXPEDIENTE	F2	X_CRTM05	Y_CRTM05	Alt. (m.s.n.m.)	Q (L/s)	ESTADO
6382	A	463698	1145555	570,43	0,00	CANCELADO
6834	A	461198	1145658	556,78	1,10	CANCELADO
6382	A	461198	1145608	572,39	0,00	CANCELADO
6382	A	461198	1145908	537,92	0,00	CANCELADO
6382	A	463498	1145455	578,77	0,00	CANCELADO
6382	A	463498	1145855	553,40	0,00	CANCELADO
1450	A	458800	1147760	410,51	0,00	CANCELADO
8255	A	443444	1141326	229,40	0,00	CANCELADO
4840	A	452806	1152567	112,88	0,00	CANCELADO
4786	A	457906	1153461	160,58	0,00	CANCELADO
8741	A	455160	1156364	94,26	0,00	CANCELADO
4569	A	461098	1145308	586,94	0,60	CANCELADO
9975	A	461248	1145458	586,17	0,60	CANCELADO
2734	A	461298	1145358	595,22	0,00	CANCELADO
4601	A	457999	1145961	530,00	0,00	CANCELADO
2819	A	459200	1146960	513,59	0,00	CANCELADO
8145	A	453002	1149266	360,00	0,00	CANCELADO
3078	A	452495	1141767	620,00	0,00	CANCELADO
8559	A	452752	1149317	380,00	0,00	CANCELADO
3660	A	455094	1141714	737,72	0,00	CANCELADO
2753	A	452001	1147767	480,00	0,00	CANCELADO
2884	A	458886	1133860	1726,25	0,00	CANCELADO
7457	A	459688	1135759	1990,00	0,11	CANCELADO
3548	A	454089	1136065	1160,60	0,00	CANCELADO
3911	A	452398	1144667	525,27	0,00	CANCELADO
3994	A	452001	1148267	421,14	0,00	CANCELADO
7660	A	458449	1145911	548,67	0,00	EN TRAMITE
7660	A	458299	1146411	508,36	0,00	EN TRAMITE
7660	A	459500	1147360	444,34	0,00	EN TRAMITE
7660	A	459150	1147035	505,24	0,00	EN TRAMITE
599	R	463460	1145943	550,16	0,00	EN TRAMITE
599	R	463528	1145434	576,28	0,00	EN TRAMITE
13134	A	461518	1145392	579,14	0,00	EN TRAMITE
599	R	463493	1146088	546,33	0,00	EN TRAMITE
13134	A	461641	1144945	637,67	0,00	EN TRAMITE
13134	A	461520	1145417	576,80	0,00	EN TRAMITE
495	R	458000	1147236	525,34	0,00	EN TRAMITE
495	R	457975	1147311	487,46	0,00	EN TRAMITE
495	R	458000	1147361	469,13	0,00	EN TRAMITE
12251	A	444502	1148375	100,00	0,00	EN TRAMITE
12800	A	449301	1147470	270,74	0,00	EN TRAMITE
13183	A	445546	1143014	224,13	0,00	EN TRAMITE
11904	A	450754	1150769	92,21	0,00	EN TRAMITE

EXPEDIENTE	F2	X_CRTM05	Y_CRTM05	Alt. (m.s.n.m.)	Q (L/s)	ESTADO
13372	A	459006	1152660	238,68	0,00	EN TRAMITE
12598	A	452992	1139816	790,17	0,00	EN TRAMITE
12301	A	453998	1145465	471,00	0,00	EN TRAMITE
13076	A	457021	1143562	818,51	0,00	EN TRAMITE
558	R	456815	1147387	442,34	0,00	EN TRAMITE
558	R	456069	1135231	1407,15	0,00	EN TRAMITE
558	R	456830	1147397	425,49	0,00	EN TRAMITE
558	R	456820	1147392	427,90	0,00	EN TRAMITE
558	R	456825	1147387	438,20	0,00	EN TRAMITE
12060	A	453491	1138066	973,35	0,00	EN TRAMITE
558	R	456782	1134754	1525,54	0,00	EN TRAMITE
558	R	453457	1137068	1081,75	0,00	EN TRAMITE
558	R	456491	1134757	1480,00	0,00	EN TRAMITE
196	R	460066	1152659	160,00	1,00	INSCRITO
57	R	464399	1146404	480,00	0,90	INSCRITO
57	R	464599	1146354	470,51	2,70	INSCRITO
369	R	461698	1145707	598,18	2,80	INSCRITO
324	R	463276	1143406	858,58	2,00	INSCRITO
324	R	463295	1143205	890,00	6,00	INSCRITO
70	R	463798	1145955	537,05	5,20	INSCRITO
225	R	460355	1152059	208,88	8,70	INSCRITO
17	R	460605	1151758	220,00	9,00	INSCRITO
14	R	461105	1151958	187,78	12,00	INSCRITO
587	R	450619	1146419	400,97	0,69	INSCRITO
435	R	448472	1144271	280,00	1,43	INSCRITO
587	R	450700	1146299	440,00	1,14	INSCRITO
435	R	447646	1143022	280,00	4,75	INSCRITO
184	R	454009	1155366	100,00	1,15	INSCRITO
410	R	450900	1142474	584,99	13,10	INSCRITO
464	R	452342	1152387	110,00	15,92	INSCRITO
587	R	450689	1146359	434,52	16,89	INSCRITO
436	R	460698	1145133	640,81	0,00	INSCRITO
436	R	456960	1147312	460,00	1,50	INSCRITO
436	R	456980	1147272	481,43	4,00	INSCRITO
436	R	459149	1146420	562,84	0,00	INSCRITO
584	R	459200	1147210	463,03	0,00	INSCRITO
436	R	457040	1147212	512,38	8,00	INSCRITO
436	R	460398	1145419	652,38	18,50	INSCRITO
112	R	458498	1145861	553,49	26,00	INSCRITO
584	R	458149	1146061	520,00	5,12	INSCRITO
469	R	464302	1149499	299,20	1,42	INSCRITO
469	R	464531	1149485	286,64	7,88	INSCRITO
327	R	456697	1144762	601,72	1,60	INSCRITO

EXPEDIENTE	F2	X_CRTM05	Y_CRTM05	Alt. (m.s.n.m.)	Q (L/s)	ESTADO
321	R	453591	1138265	931,24	2,50	INSCRITO
264	R	455343	1140114	871,46	2,60	INSCRITO
24	R	452890	1137566	940,00	8,14	INSCRITO
412	R	455005	1142054	706,02	3,00	INSCRITO
326	R	454894	1141664	721,71	6,20	INSCRITO
326	R	454994	1141614	732,72	6,20	INSCRITO
321	R	453341	1138616	900,16	0,50	INSCRITO
264	R	454993	1140214	802,46	6,60	INSCRITO
412	R	454995	1142064	702,78	10,00	INSCRITO
385	R	455946	1143163	710,00	5,20	INSCRITO
32	R	451953	1149868	261,78	3,60	INSCRITO
413	R	456697	1144662	605,60	18,00	INSCRITO
442	R	455068	1139989	844,46	39,80	INSCRITO
385	R	455870	1142803	735,11	30,80	INSCRITO
11285	A	462251	1148457	390,97	0,05	OTORGADO
10031	A	465803	1150753	248,63	0,50	OTORGADO
10334	A	463199	1146156	564,09	0,09	OTORGADO
11024	A	464302	1149555	297,88	3,00	OTORGADO
10080	A	464402	1149454	291,49	3,00	OTORGADO
7688	A	444299	1145325	165,79	0,02	OTORGADO
12628	A	448991	1153021	79,49	0,05	OTORGADO
10045	A	446893	1140472	529,47	0,25	OTORGADO
9719	A	445998	1145074	190,00	0,60	OTORGADO
5135	A	452806	1152567	112,88	2,10	OTORGADO
10297	A	450754	1150569	108,44	3,55	OTORGADO
9493	A	449199	1145570	284,24	0,70	OTORGADO
9300	A	443293	1140426	269,16	0,60	OTORGADO
9660	A	443894	1140576	260,00	0,46	OTORGADO
5495	A	455957	1153493	160,00	0,25	OTORGADO
7806	A	456909	1155462	138,20	0,50	OTORGADO
7222	A	458493	1145861	552,13	2,00	OTORGADO
10386	A	458508	1154711	110,00	0,15	OTORGADO
11354	A	460099	1146359	502,31	0,23	OTORGADO
12378	A	450419	1139370	745,97	0,12	OTORGADO
12378	A	450503	1139285	785,29	0,05	OTORGADO
12379	A	450987	1138892	886,46	0,05	OTORGADO
12327	A	451195	1150289	163,42	0,05	OTORGADO
2623	A	452940	1137566	958,03	0,06	OTORGADO
8219	A	457947	1143961	766,80	0,18	OTORGADO
8581	A	458300	1147261	414,07	0,20	OTORGADO
6451	A	450892	1139168	863,24	0,05	OTORGADO
9996	A	452890	1137416	995,61	0,15	OTORGADO
10134	A	450144	1141169	567,07	0,03	OTORGADO

EXPEDIENTE	F2	X_CRTM05	Y_CRTM05	Alt. (m.s.n.m.)	Q (L/s)	ESTADO
10136	A	450594	1141369	586,52	0,15	OTORGADO
10136	A	450644	1141169	600,00	0,65	OTORGADO
10136	A	450944	1140968	678,23	0,00	OTORGADO
8555	A	453498	1144916	488,74	0,17	OTORGADO
11037	A	453291	1138166	965,81	0,36	OTORGADO
9843	A	455497	1144414	596,12	2,22	OTORGADO
2885	A	458087	1134561	1718,77	0,10	OTORGADO
11965	A	453927	1144678	518,26	1,20	OTORGADO
6594	A	456794	1141262	980,51	0,20	OTORGADO
9843	A	455397	1144464	600,00	1,00	OTORGADO
9221	A	455196	1143264	679,02	0,20	OTORGADO
9221	A	455296	1142964	698,01	0,20	OTORGADO
10136	A	450695	1141719	564,15	0,65	OTORGADO
3445	A	454693	1140164	805,19	3,08	OTORGADO
11348	A	458986	1134010	1835,85	4,70	OTORGADO
10136	A	450895	1141868	590,00	0,16	OTORGADO
12091	A	452442	1136195	992,71	0,10	OTORGADO
6942	A	453698	1144866	482,42	0,10	OTORGADO
3391	A	454980	1142029	701,47	20,86	OTORGADO
908	H	453748	1144915	507,46	30,00	OTORGADO
8392	A	461236	1133757	2113,79	14,70	OTORGADO
12070	A	464725	1146861	440,00	0,90	OTORGADO

Fuente: Dirección de Agua, MINAET (2011)

El mapa de la Figura 20, muestra la ubicación de nacientes en el área de estudio.

Como lo muestra el Cuadro 10, en el área de estudio se aprovecha un total de 1.022,58 L/s (según los registros). El mayor aprovechamiento se da para el abastecimiento público y usos domésticos, con un caudal de 664,63 L/s (63,04 % del total).

Cuadro 10: Usos del agua en el área de estudio

Manantiales			Pozos		
Uso	Q (L/s)	%	Uso	Q (L/s)	%
AGROPECUARIO	12,47	1,55	AGROINDUSTRIAL	30,91	14,07
AGROINDUSTRIAL	0,00	0,00			
RIEGO	53,82	6,70	RIEGO	8,60	3,91
ABAST. PÚBLICO	322,10	40,12	ABAST. PÚBLICO	99,95	45,50
COMERCIO	4,70	0,59			
INDUSTRIA	31,22	3,89	INDUSTRIAL	46,30	21,08
FUERZA HIDRICA	33,00	4,11			
TURISMO	23,07	2,87	DOMESTICO	33,91	15,44
ACUEDUC. RURAL	322,53	40,17			
Total:	802,91	100,00	Total:	219,67	100,00

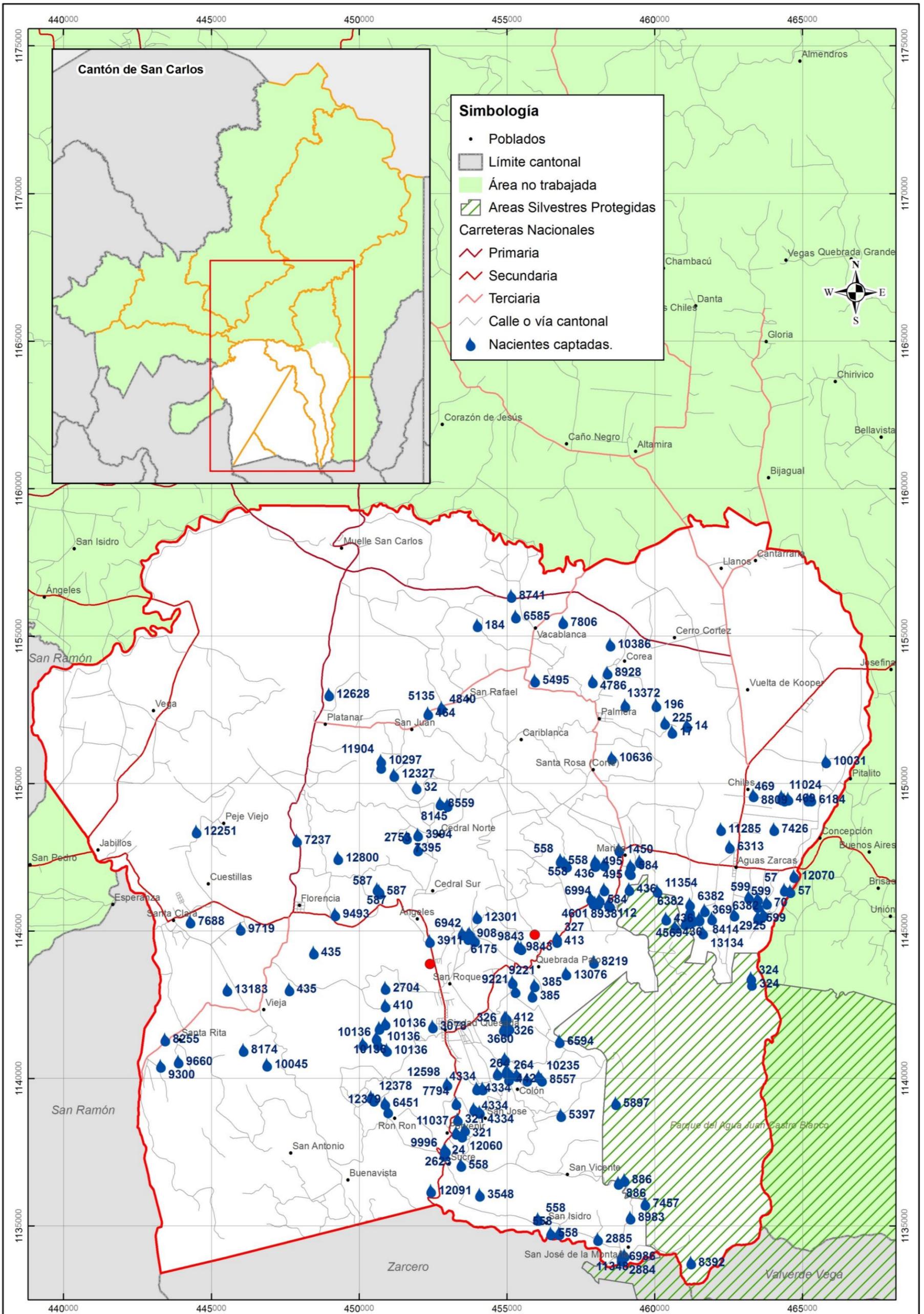


Figura 20: Mapa de ubicación de nacientes en el área de estudio. Fuente: Dirección de Agua, MINAET (2011).

5.1.2 Líneas isofreáticas y dirección del flujo subterráneo

Para lograr definir el patrón del flujo subterráneo se requiere contar con datos de niveles freáticos. Sin embargo, como se mencionó en párrafos anteriores, existe una carencia de información que permita construir las curvas isofreáticas a partir de niveles estáticos medidos en pozos

Ante esta circunstancia, se ha propuesto interpolar los niveles topográficos de los cursos de agua que cuentan con flujo base en época de estiaje y los niveles topográficos de las nacientes identificadas.

La construcción de curvas isofreáticas a partir del nivel topográfico de los cursos de agua, se basa en el principio de que los cursos de agua en el área de estudio tienen un comportamiento efluente con respecto al acuífero. Esta suposición se basa en observaciones de campo, en las cuales se notó que en dirección aguas abajo, el caudal en los ríos y quebradas de la zona aumenta en función de la distancia.

Por tanto, para generar las curvas isofreáticas se contó con 173.887 puntos de altitud, separados entre sí 10 metros horizontales, a lo largo de cada segmento de río o quebrada trazados dentro del área de estudio.

Así también, se incorporaron 188 puntos de elevación correspondientes a manantiales y los puntos de elevación de nivel estático de los tres pozos que consignan esta información.

La interpolación de los datos se realizó utilizando el método de Kriging, el cual produjo resultados muy satisfactorios, ya que las curvas reprodujeron incluso el posible efecto que los rasgos morfológicos podrían tener sobre el patrón de flujo del agua subterránea.

Como se observa en la Figura 21, el agua subterránea tendría una dirección preferencial hacia el norte, con una ligera orientación hacia el oeste.

En general, el trazo de las curvas isofreáticas y las líneas de flujo sugieren que la recarga se da en las zonas altas del área de estudio, teniendo como zona descarga las llanuras sobre las que se ubican las comunidades de Muelle, Corazón de Jesús, Caño Negro, Altamira y Bijagua.

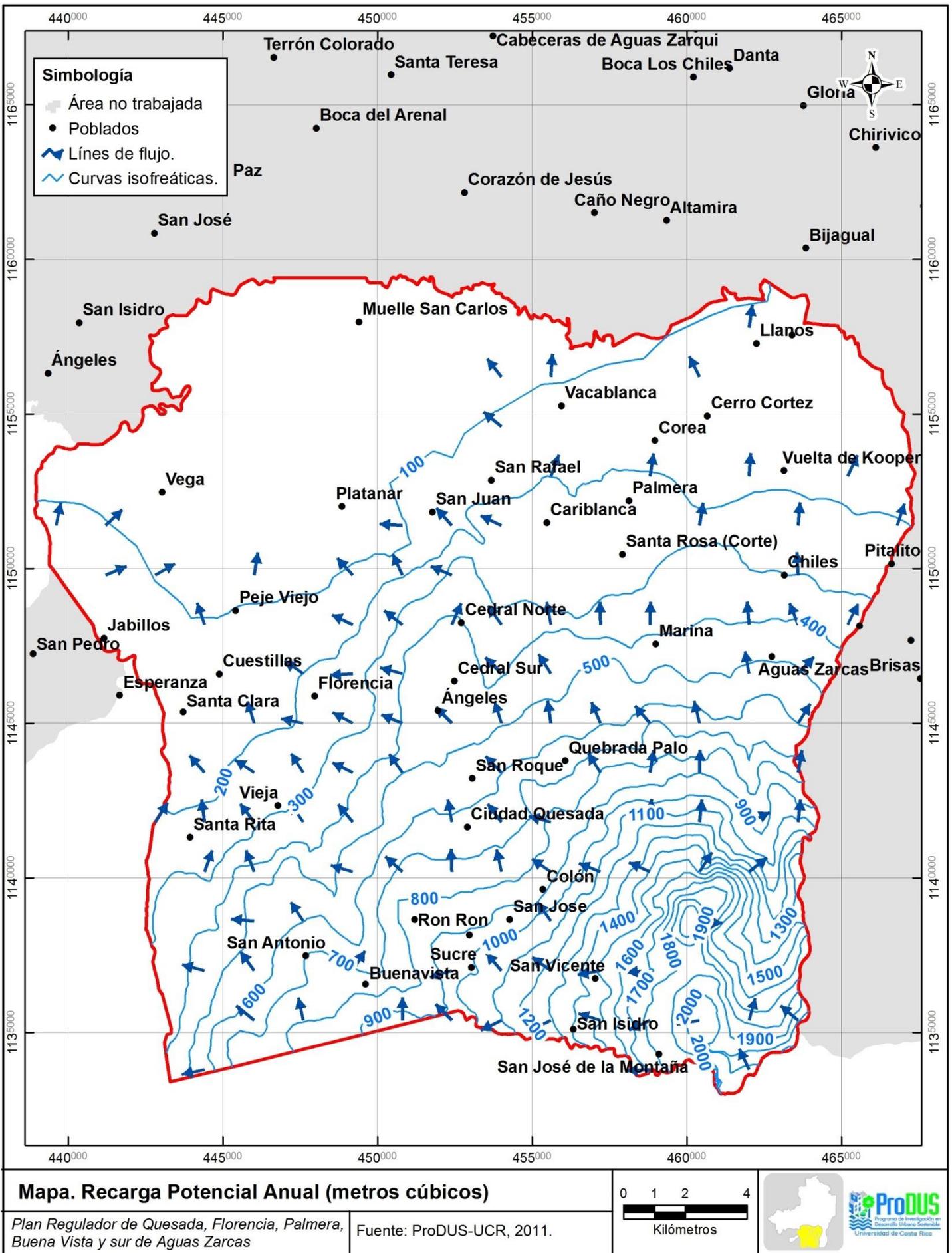


Figura 21: Mapa de curvas isofreáticas en el área de estudio.

5.1.3 Parámetros hidráulicos del acuífero

Para la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero, es necesario contar primero con información de los niveles productores bajo el área de estudio, la cual es obtenida a través de perforaciones.

No obstante, como se mencionó anteriormente, en el área de estudio tan solo se ubican tres perforaciones, para las que no se cuenta con datos de pruebas de bombeo realizadas en ellas. Por tanto, no se cuenta con la información necesaria para poder realizar con propiedad el cálculo de los parámetros hidráulicos que gobiernan el flujo del agua subterránea en el área de estudio.

Una aproximación de la magnitud de la transmisividad hidráulica del acuífero puede ser hecha a partir de los datos de nivel estático, nivel dinámico y caudal extraído del pozo. Como se mencionó anteriormente, se cuenta con esta información para solo tres pozos del área de estudio.

La transmisividad se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unitario.

Permite conocer el caudal que pasa a través de una sección cualquiera de un acuífero, toda vez que sean conocidos el espesor saturado del acuífero (b), el gradiente hidráulico (i), y la conductividad hidráulica del acuífero (K).

La ley de Darcy, $Q = KiA$, se transforma en $Q = KbLi$; es decir, $Q = Tli$, siendo T la transmisividad del acuífero.

Según Custodio & Llamas (1983), conociendo los caudales extraídos en cada pozo y los correspondientes descensos dinámicos (s) producidos por el bombeo, se puede calcular los caudales específicos de los mismos (Q/s), que en principio, y en régimen permanente, cabe considerar como directamente proporcionales a la transmisividad del acuífero.

$$T \text{ (m}^2\text{/d)} = \frac{100 * Q(l/s)}{s(m)}$$

Con base en la información de los pozos de la zona de estudio, en los cuales se tienen registros de los parámetros ya mencionados, se puede estimar la transmisividad. En este caso se tomaron los pozos denominados por el SENARA como pozo AZ – 5 y AZ - 15, los cuales se ubican sobre la unidad “Depósitos laháricos finos” del mapa de la Figura 2, sin embargo, según el registro litológico de estos pozos, el primero está captando lavas fracturadas de composición andesítica, y el segundo está captando depósitos de arenas y gravas; por consiguiente los valores de transmisividad que se calculen corresponderán a estos materiales. Se debe considerar que este es un valor relativo dado que se requiere un análisis exhaustivo a través de pruebas de bombeo para obtener la transmisividad del acuífero en cada punto; sin embargo para los propósitos de este estudio la aproximación por la fórmula de Galofré se considera apropiada. A continuación se presentan los valores calculados de la transmisividad.

Cuadro 11: Parámetros hidrogeológicos para tres pozos del área de estudio

Código	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Caudal (l/s)	Abatimiento (m)	Rendimiento específico (l/s/m)	Transmisividad estimada (m ² /d)
AZ – 5	10,15	49,96	12,0	39,81	3,3175	331,75
AZ – 15	6,00	30,00	2,70	24,00	8,8889	888,89

Tanto los valores de transmisividad como los valores de los rendimientos específicos de los pozos del Cuadro 11, muestran que los materiales lávicos captados por el pozo AZ – 5 y las arenas y gravas captadas por el pozo AZ – 15, corresponden a acuíferos de buen rendimiento para la extracción de agua subterránea.

Según se deduce de los registros litológicos de estos pozos, los mismos podrían estar captando acuíferos confinados a semiconfinados.

5.2 Modelo conceptual del acuífero

Si bien es cierto no se cuenta con información de perforaciones con las cuales caracterizar el medio acuífero, se puede realizar al menos las siguientes observaciones:

- Según el mapa geológico de la Figura 2, el área de estudio se encuentra cubierta principalmente por la unidad “Depósitos laháricos finos”, la cual según observaciones de campo, corresponde con bloques heterogéneos de forma angular y redondeada, los cuales se encuentran inmersos en una matriz limo – arcillosa a limo - arenosa. Esta unidad se puede clasificar como un acuitardo, el cual según los registros litológicos de perforaciones, se ubican sobre lavas de composición andesítica, las cuales ubican a una profundidad de 20 a 24 metros.
- En lo que respecta a la porosidad, al tratarse mayoritariamente de rocas de origen ígneo, las mismas no cuentan con porosidad primaria; cuentan con porosidad secundaria, originada por el fracturamiento inducido por los esfuerzos tectónicos o por el enfriamiento de los cuerpos lávicos.
- Según se observó en el campo, hacia las zonas de baja pendiente, la cobertura cambia de lahares a capas potentes materiales limo – arcillosos a limo – arenosos, las cuales ha sido depositadas posiblemente por eventos de inundación; el espesor de esta cobertura puede variar de 10 – 15 por lo general, aunque también se han registrado valores de 3 metros. Subyaciendo esta cobertura se ubican depósitos aluviales gruesos (arenas a bloques), cuya matriz puede ser de arenas, o incluso limos o arcillas. La distribución de estos depósitos aluviales se encuentra condicionada por la distribución geográfica de los relictos de erosión de estructuras volcánicas presentes en la zona.
- La capacidad de los pozos es muy variada, registrándose valores desde 0,25 L/s hasta 20 L/s. Se intentó relacionar la producción de los pozos con la geología de zona, sin embargo no existe una clara relación entre la magnitud de los caudales de producción y las unidades geológicas regionales.
- En la totalidad del área de estudio, el mecanismo de recarga predominante lo constituye la infiltración directa de precipitación. Posteriormente, el agua infiltrada fluye pendiente abajo hacia los cauces principales de los ríos que drenan el área de estudio, teniendo un comportamiento efluente al acuífero, según se observó en el campo.

5.3 Vulnerabilidad a la contaminación.

Para evaluar la posibilidad de contaminación en una zona determinada se deben considerar los principios del transporte de contaminantes en los sistemas acuíferos subterráneos. Para ello es indispensable contar con los siguientes parámetros claves para determinar la vulnerabilidad a la contaminación microbiológica:

- a) El espesor de la zona permanentemente no saturada. Este parámetro tiene un comportamiento asimétrico en el área de estudio.
- b) El material sobreyacente al acuífero, el cual es definido por el mapa geológico del área de estudio.
- c) El grado de confinamiento y el carácter de los acuíferos de donde se obtiene el agua subterránea. Este parámetro es definido por el modelo hidrogeológico correspondiente al área de estudio.

Tomando en cuenta los parámetros mencionados, es posible establecer un criterio de vulnerabilidad para el caso en estudio; éste se refiere al sistema GOD para la evaluación del índice de vulnerabilidad del acuífero (Foster et. al, 2003), donde "G" se refiere al grado de confinamiento del acuífero, "O" al material sobreyacente y "D" al espesor de la zona no saturada. Cada uno de estos parámetros tendrá un valor entre 0 y 1 según las especificaciones de la Figura 22. El índice de vulnerabilidad se obtiene del producto de los valores asignados a cada parámetro, y su magnitud determinará si la vulnerabilidad es: ninguna, baja, moderada, alta o extrema.

La Figura 23, Figura 24 y Figura 25, muestran los valores para cada parámetro de la Figura 22 a lo extenso del área de estudio, y esto en función de las características geológicas e hidrogeológicas que presenta cada una de las cuencas analizadas.

El mapa de la Figura 26, muestra la zonificación del área de estudio de acuerdo al Índice de Vulnerabilidad Intrínseca GOD.

Como se observa en dicha figura, en la mayor parte del área de estudio la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación es "Baja"; tan solo se observan dos pequeñas zonas que muestran vulnerabilidad intrínseca "Media", la cual corresponde a la unidad de "Depósitos aluviales indiferenciados". Los poblados más cercanos a la zona de vulnerabilidad media son San Rafael, Vaca Blanca y Los Ángeles (este último fuera del área de estudio).

El Servicio de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), en el acuerdo N° 3303 de su Junta Directiva, de la sesión extraordinaria N. 239-06 del 26 de setiembre de 2006, aprueba la "Matriz de criterios de uso del suelo según la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la protección del recurso hídrico". Según esta matriz, a partir del mapa de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, se estaría sugiriendo o recomendando usos de suelos, de forma tal que los mismos no atenten contra la calidad del recurso hídrico.

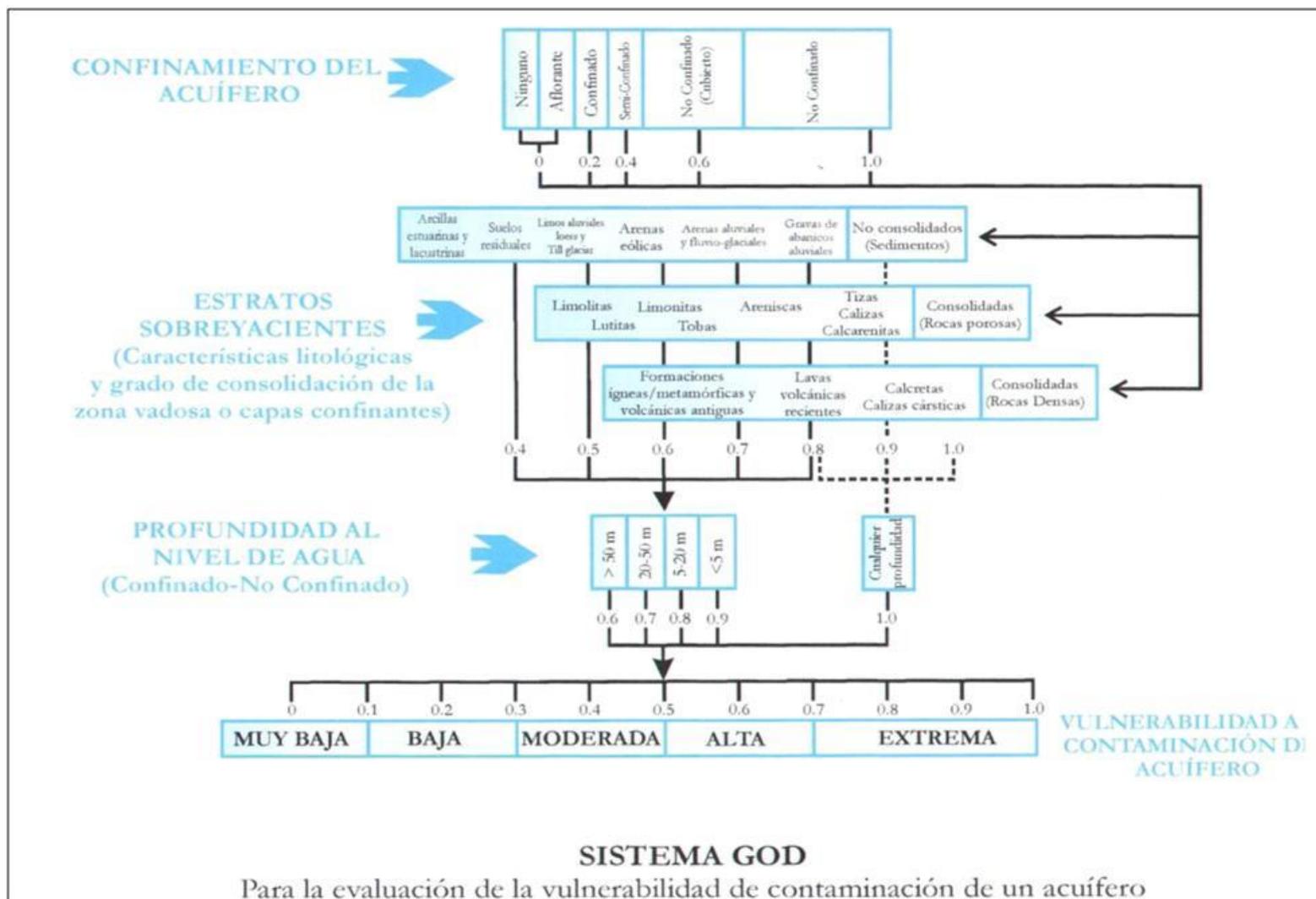
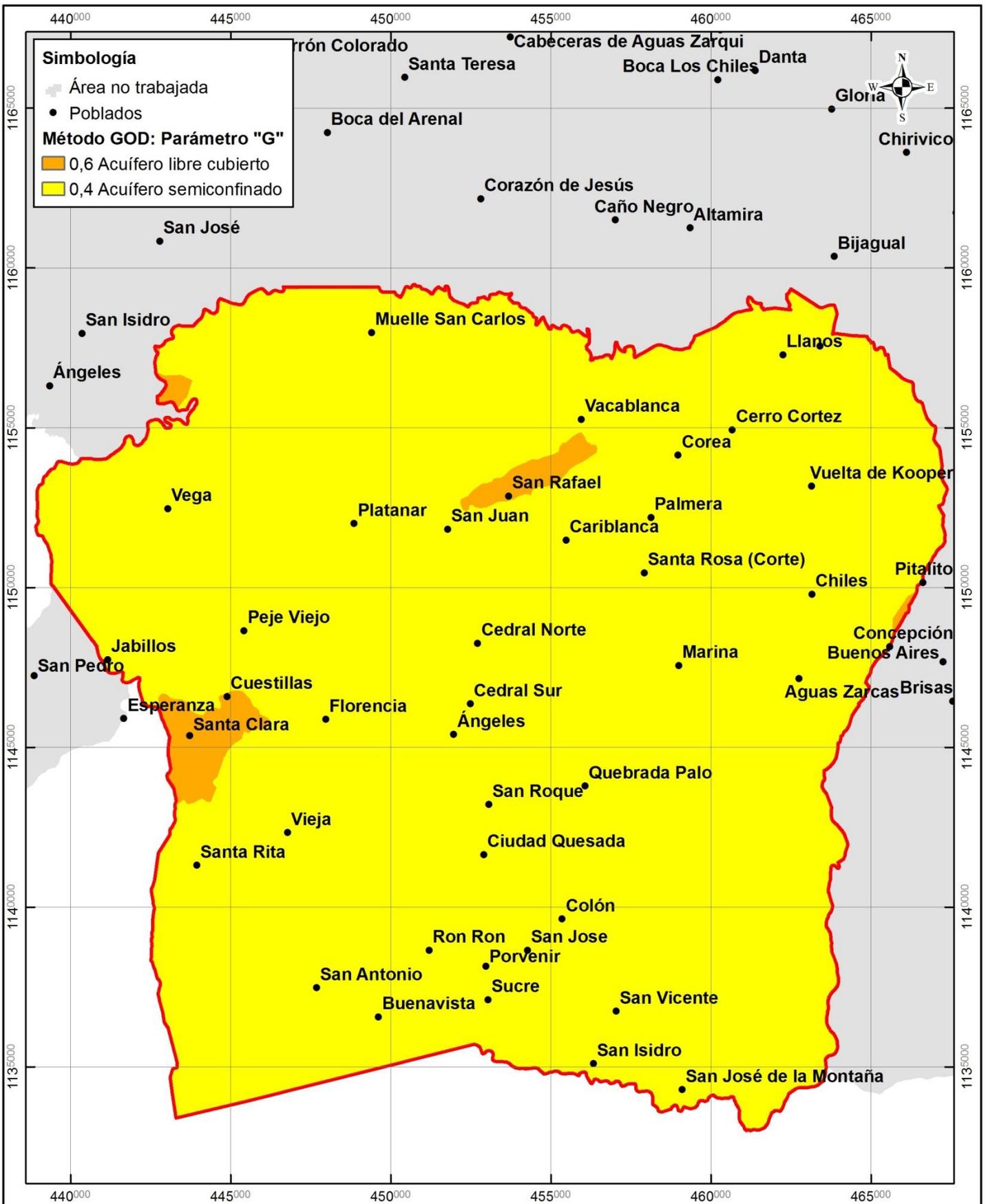


Figura 22: Esquema del Sistema GOD. Tomado de Foster et. al (2003).



<p>Mapa. Vulnerabilidad Intrínseca GOD: Parámetro "G"</p> <p><i>Plan Regulador de Quesada, Florencia, Palmera, Buena Vista y sur de Aguas Zarcas</i></p>		<p>Fuente: ProDUS-UCR, 2011.</p>	<p>0 1 2 4</p> <p>Kilómetros</p>	<p>ProDUS Programa de Investigación en Ciencias Urbanas y Ambientales Universidad de Costa Rica</p>
---	--	----------------------------------	----------------------------------	--

Figura 23: Parámetro "G" del Índice de Vulnerabilidad GOD para el área de estudio.

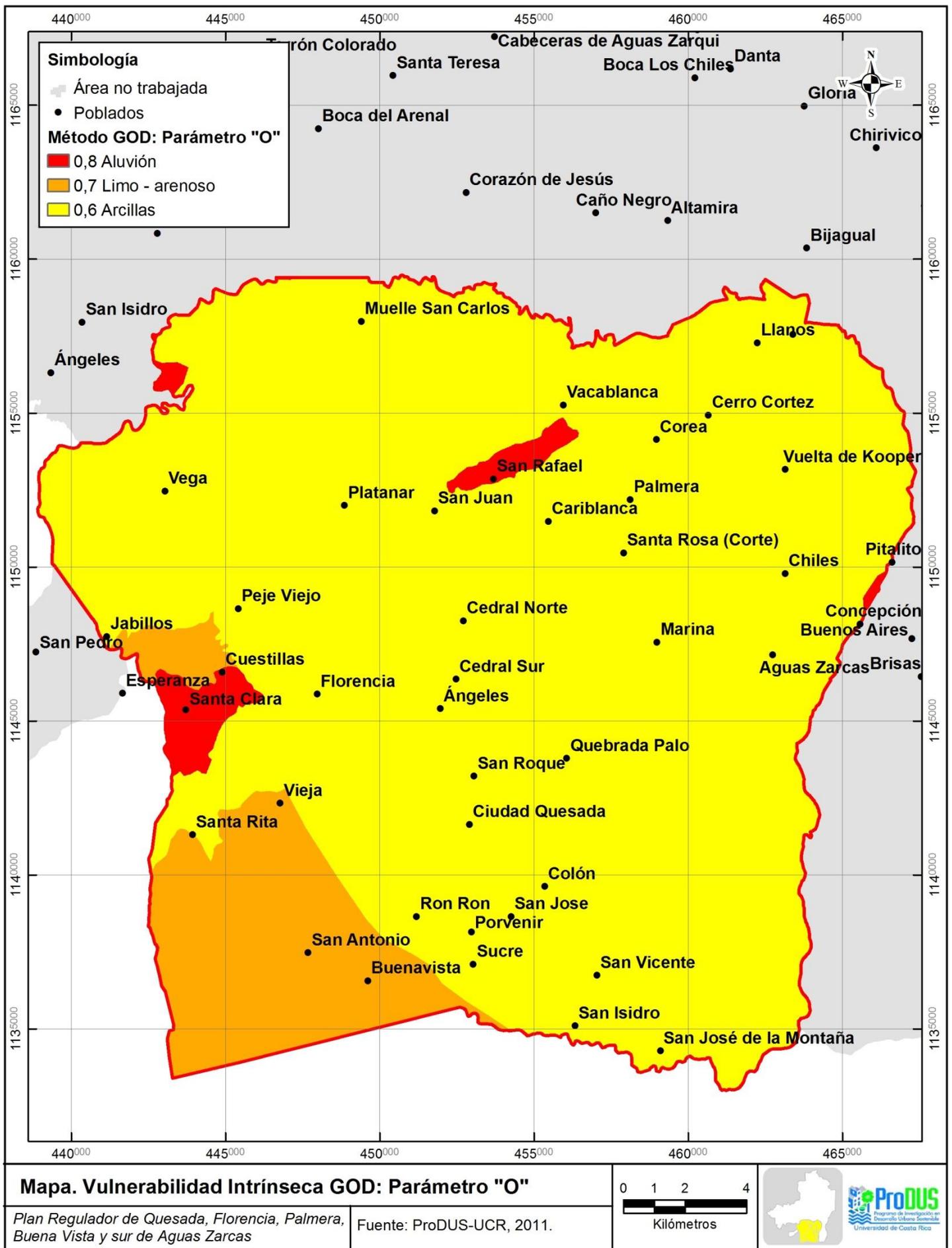


Figura 24: Parámetro "O" del Índice de Vulnerabilidad GOD para el área de estudio.

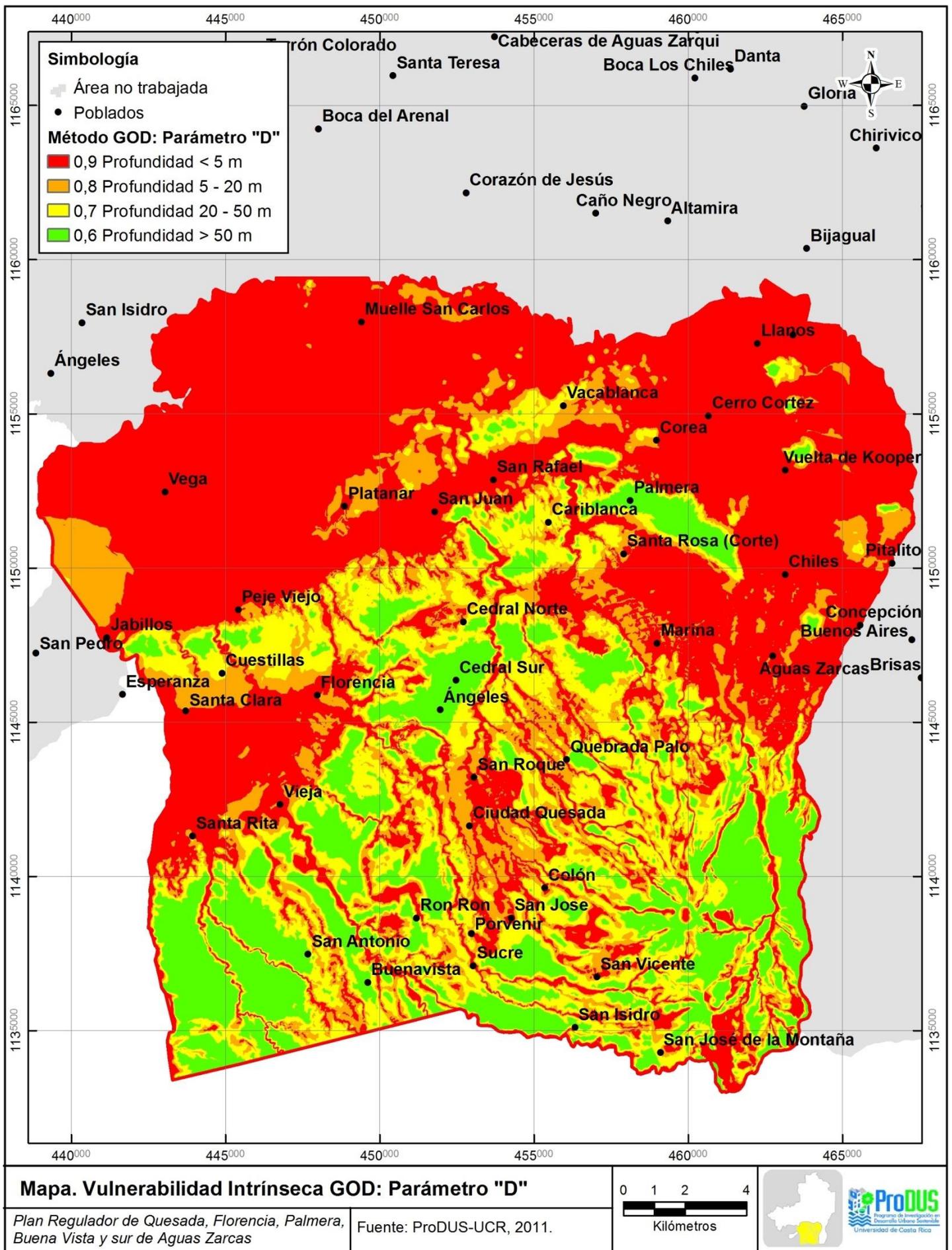


Figura 25: Parámetro "D" del Índice de Vulnerabilidad GOD para el área de estudio.

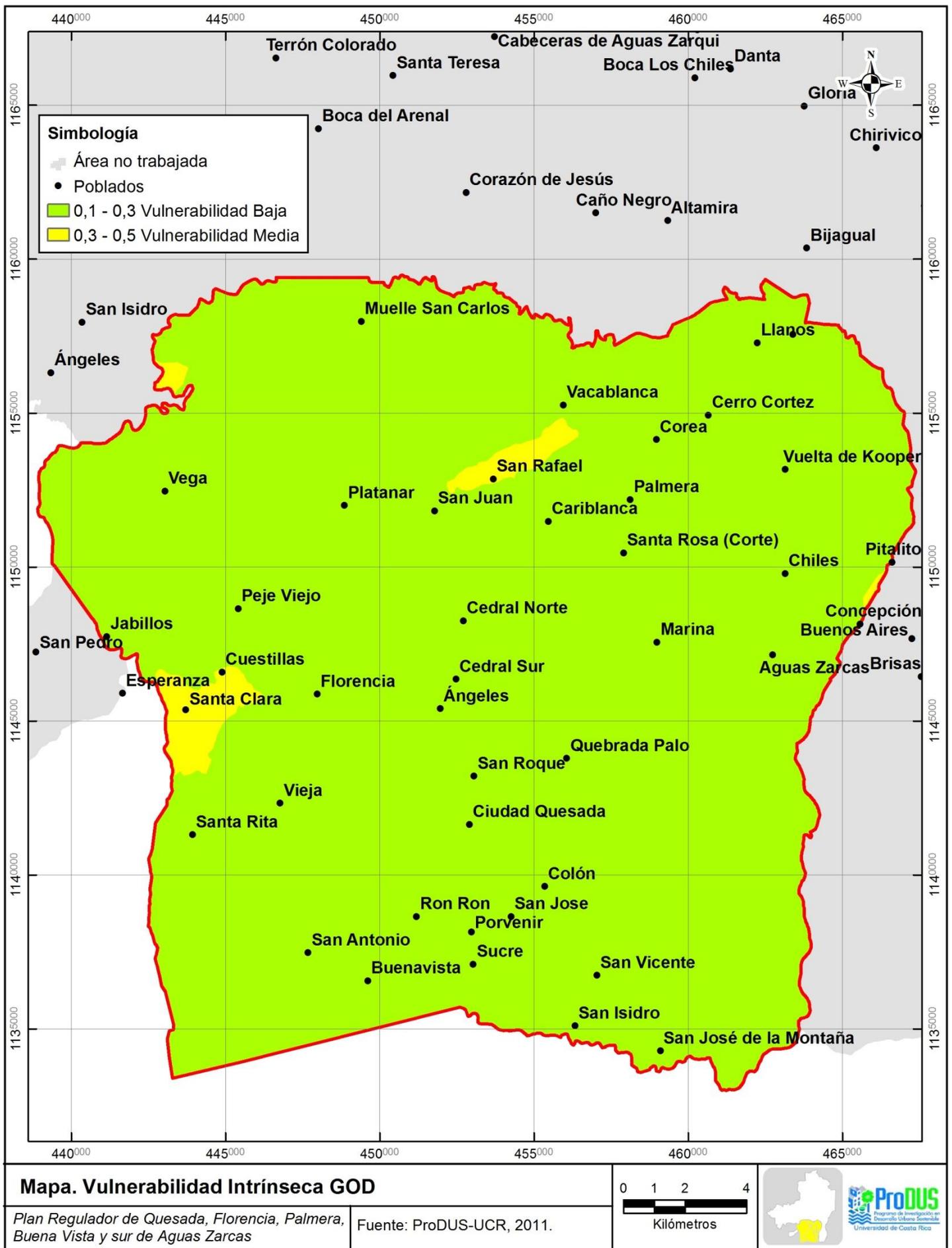


Figura 26: Índice de Vulnerabilidad Intrínseca GOD para el área de estudio.

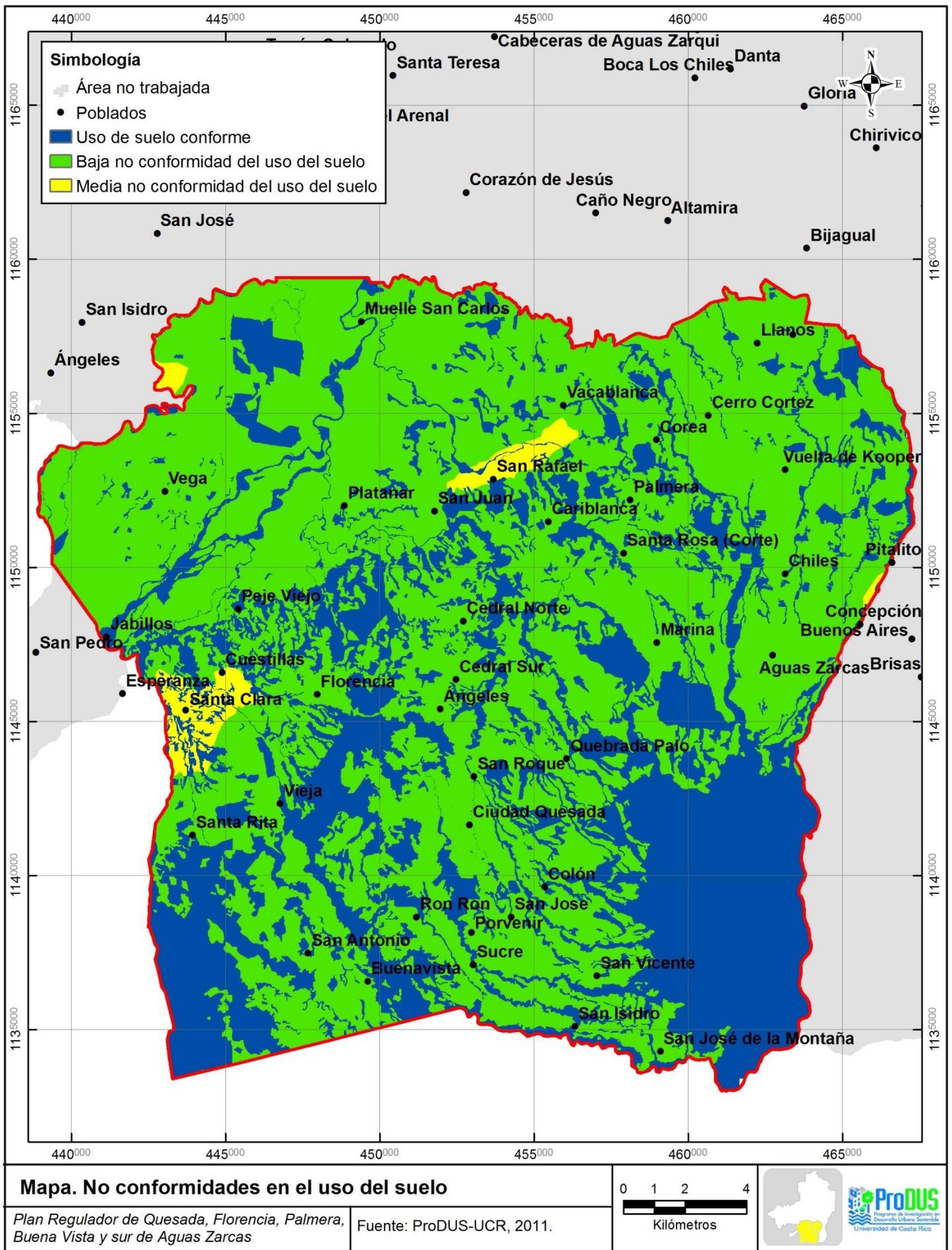


Figura 27: Mapa de no conformidades en el uso del suelo para el área de estudio.

Utilizando como insumo el mapa de uso de suelo de la Figura 11 y el mapa de vulnerabilidad intrínseca de la Figura 26, se ha aplicado dicha matriz con el fin de detectar posibles usos no conformes del suelo con respecto a la matriz ya mencionada; como resultado se ha obtenido el mapa de usos de suelo no conformes de la Figura 27.

Como se observa en la Figura 27, en el área de estudio se da mayoritariamente una “Baja no conformidad” en el uso del suelo, el cual corresponde con zonas de pastos con árboles dispersos, donde la vulnerabilidad intrínseca se considera “Baja”. En segundo lugar, se observan zonas clasificadas como de “Uso conforme” del suelo, las cuales corresponden con bosques y cuerpos de agua. Finalmente, se tienen áreas donde el uso del suelo presenta una “No conformidad media”, correspondiendo con actividades productivas en sitios de vulnerabilidad intrínseca “Media”. En este último caso, la matriz indica que:

- Los cultivos pueden darse “...*siempre y cuando se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe contar con un plan de manejo de suelos de acuerdo al decreto 23214-MAG-MIRENEM. Se debe dar un manejo y tratamiento de los efluentes. La actividad debe contar con una certificación de buenas prácticas agrícolas.*”
- Los sistemas urbanísticos con alcantarillado y planta de tratamiento podrán darse “...Se puede permitir con densidades inferiores a 150 hab/ha o lotes de 330 metros cuadrados. El área de impermeabilización por hectárea no debe sobrepasar el 30%”.
- La actividad ganadera podrá permitirse “...*siempre que se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe de contar con potreros mejorados, protección de nacientes, pozos y cursos de agua de acuerdo a la legislación vigente y contar con prácticas de conservación de suelos.*”

6 CONCLUSIONES

El área de estudio se ubica en una región donde la geología está dominada por materiales de origen volcánico, principalmente lavas y flujos de lodo, los cuales estarían propiciando la presencia de acuíferos confinados o semiconfinados, relativamente superficiales (de 20 – 24 metros de profundidad). Al igual que los acuíferos volcánicos del Valle Central, estos materiales tendrían un buen potencial de producción, donde las lavas constituyen los niveles productores.

Los depósitos aluviales están muy restringidos espacialmente en el área de estudio, y según se observó en el campo, estarían conformados por lentes de arenas, gravas y bloques redondeados en una matriz limo – arcillosa o limo – arenosa. En las llanuras ubicadas al norte del área de estudio, se observa una marcada predominancia de depósitos de material de granulometría fina, los cuales cubre prácticamente la totalidad de la planicie, por lo que no se prevé que constituyan acuíferos de alta producción.

La planicie sobre la que se ubica la comunidad de Santa Clara, alberga un depósito aluvial restringido especialmente, pero que al mismo tiempo es el que muestra las granulometrías mayores de material aluvial, además del hecho de ser disectada por varios cursos superficiales de agua. Estas condiciones suponen que en este sector se ubicaría un acuífero aluvial cuyo potencial productor podría ser relativamente alto. No obstante, aunque este sector también muestra una cobertura de material limo – arcilloso al igual que el resto del

área de estudio, se observó en el campo que dicha cobertura presenta un espesor muy reducido (inferior a los 5 metros), por lo que podría ser muy vulnerable a la contaminación.

En lo que respecta a las zonas de recarga, las mayores magnitudes de recarga potencial se registran hacia las zonas bajas del área de estudio, específicamente aquellas zonas que corresponde con los abanicos aluviales y coluviales, específicamente, las zonas de planicie dentro del área de estudio. Los poblados que se ubican sobre estas zonas son Vega, Platanar, Muelle y Vacablanca.

Existe una zona de recarga de magnitud intermedia, dentro de la que se ubican los poblados Marina, Aguas Zarcas, Concepción, Chiles, Pitalito, Vuelta de Kooper, Cerro Cortés y Llanos.

En general, estas zonas de mayor recarga potencial, se ubican en áreas rurales donde el uso de suelo predominante son los “Pastos con árboles dispersos”, sin embargo, dentro de ellas también se ubican zonas de “Cultivos”. Esta última actividad productiva es la que debería concentrar mayor atención en el futuro por parte de las entidades de gobierno, ya que involucran el uso de agroquímicos, cuyo uso podría comprometer la calidad del agua subterránea, no solo por su propia toxicidad, sino también por su grado de permanencia y facilidad para movilizarse en el medio acuífero. En general, el control debe iniciarse con campañas de monitoreo la calidad del agua en pozos ubicados en los alrededores las plantaciones, con las cuales detectar la presencia de concentraciones anómalas (concentraciones por encima de los límites fijados por la normativa) de agroquímicos en el agua o residuos de los mismos.

No obstante, como se mencionó en párrafos anteriores, a excepción de las llanuras ubicadas en el sector norte del área de estudio, en las cuales el material de cobertura sobre el acuífero presenta espesores potentes, se tiene por el contrario que en el resto del área de estudio la cobertura de materiales limo – arcillosos o limo – arenosos presenta espesor relativamente bajos, por lo que la ejecución de estudios básicos detallados previo al desarrollo de cualquier actividad productiva, serán vitales para la prevención de efectos adversos sobre los mantos productores de agua.

Los resultados producto de este estudio muestran un área con una recarga potencial ($347.678.793 \text{ m}^3 / \text{año}$) que supera por mucho la demanda actual sobre el recurso hídrico subterráneo ($32.248.083 \text{ m}^3 / \text{año}$), sin embargo, la carencia de información secundaria sobre el área de estudio, impidió una caracterización más detallada de los acuíferos presentes en la zona. En términos generales, será preciso desarrollar estudios más detallados en la zona, los cuales que incluyan ensayos de campo y laboratorio, cuyos resultados permitirán establecer en mejor forma la distribución de los acuíferos, sus propiedades hidráulicas, los mecanismos de recarga y descarga, espesor del material de cobertura sobre los acuíferos y sus propiedades físicas, mejora en la zonificación de áreas vulnerables a la contaminación, etc.

7 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Custodio, E. & Llamas, M., 1983: “Hidrología Subterránea”. – 1161 págs. Tomo I. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España.

- Denyer, P. & Alvarado, G.E., 2007: "Mapa Geológico de Costa Rica". – Escala 1:400.000. Librería Francesa S.A. San José, Costa Rica.
- Denyer, P. & Kussmaul, S. [compiladores], 2000: "Geología de Costa Rica". – 520 págs. Primera Edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Doorendbos, J. & Pruitt, W., 1986: "La necesidad de riego de los cultivos". Colección FAO: Estudio de FAO Riego y Drenaje N° 24. Roma.
- Fernández, J.A., Aguilar, A., Arrieta, L., Astorga, A., Barboza, G., Barrientos, J., Bolaños, X., Bottazzi, G., Bustos, I., Calvo, C., Campos, L., Escalante, G., Laurito, C., Obando, J., Pizarro, D., Rojas, J.F., Tejera, R., Valerín, E. & Ulate, R., 1997: "Mapa Geológico de Costa Rica". – Escala 1:750.000. Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). Dirección de Geología y Minas – Dirección de Hidrocarburos. Ministerio del Ambiente y Energía. San José, Costa Rica.
- Foster, S. & Hirata, R., 1991: "Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas". CEPIS. Lima, Perú.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. & Paris, M., 2003: "Protección de la calidad de agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales". – 115 págs. Groundwater Management Advisory Team. Banco Mundial, Washington, D. C.
- IGN, 2001: "División territorial administrativa de la República de Costa Rica". – 133 págs. 1ª Edición. Departamento Territorial y Nomenclatura. Instituto Geográfico Nacional. San José, Costa Rica.
- Schosinsky, G. & Losilla, M., 2000: "Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual". – Revista Geológica de América Central, 23: 43 – 55.
- Schosinsky, G., 2006: "Cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante balance hídrico de suelos". – Revista Geológica de América Central, 34 – 35: 13 – 30.
- SENARA, 2011: "Base de datos de la Dirección de Investigación y Gestión Hídrica". – <http://www.senara.or.cr/direccion%20de%20investigacion%20y%20gestion%20hidrica/senara1.html>
- Sprechmann, P. [editor], 1984: "Manual de Geología de Costa Rica". – 320 págs. Volumen 1: Estratigrafía. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Soto, J., 1989: "Diseño de sistema de riego para finca de uso agrícola múltiple". Escuela de Ingeniería Agrícola. Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. San Pedro, Costa Rica. [Tesis para optar al grado de licenciado]
- Tournon, J. & Alvarado, G.E., 1997: "Mapa Geológico de Costa Rica". – Escala 1:500.000, Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

Tournon, J. & Alvarado, G.E., 1997: "Mapa Geológico de Costa Rica: folleto explicativo". – 1ª Edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 79 pp.

Villón, M.2004: "Hidrología". Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 474 pág.