



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA



MINISTERIO DE AGRICULTURA,
GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN
UPGGR



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA
REPÚBLICA DE GUATEMALA A ESCALA DE RECONOCIMIENTO
(1:250,000), COMO APOYO AL DESARROLLO DEL RIEGO PARA LA
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN COMUNIDADES DE PEQUEÑOS Y
MEDIANOS PRODUCTORES
INFORME DEL PROYECTO**



CORDILLERA S.A.



LA
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA
REPÚBLICA DE GUATEMALA A ESCALA DE RECONOCIMIENTO (1:250,000),
COMO APOYO AL DESARROLLO DEL RIEGO PARA LA PRODUCCIÓN
AGRÍCOLA EN COMUNIDADES DE PEQUEÑOS Y MEDIANOS PRODUCTORES

Fue elaborada bajo el auspicio de
**La Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
(USAID)**

POR
CORDILLERA S.A.
Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC)
Centro Universitario del Norte (CUNOR)
Carrera de Geología

y
Asociación para el Manejo Sostenible de los Recursos Kársticos y
Espeleológicos-ASOKARST

Aporte de información básica y revisión:
Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo UPGGR
Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación MAGA

CONTENIDO

	Pagina
Personal que participó en el estudio	ii
Agradecimientos	iii
Resumen Ejecutivo	iv
CAPITULO I. Datos generales del estudio	1
1. Introducción	1
2. Antecedentes	1
3. Objetivos del estudio	5
CAPITULO II. Metodología para la evaluación del potencial de aguas subterráneas	7
2.1. Aspectos metodológicos generales	7
2.2. Enfoque metodológico adoptado	8
2.2.1. Densidad de drenaje fluvial	10
2.2.2. Análisis de pendientes del terreno	11
2.2.3. Análisis de lluvia anual	12
2.2.4. Lineamientos estructurales	12
2.2.5. Geomorfología	18
2.2.6. Tipos de roca (Litología)	20
2.2.7. Cuerpos de agua	21
2.3. Análisis integrado de factores condicionantes para la identificación y delimitación del potencial de aguas subterráneas	21
2.4. Evaluación cuantitativa del potencial de aguas subterráneas	24
2.5. Elaboración de listados de comunidades según potencial de aguas subterráneas	26
CAPITULO III. Conclusiones y recomendaciones para el uso y aplicación de los mapas de potencial de aguas subterráneas	27
Anexo A. Estudio de procesos hidrológicos a diferentes escalas (Scaling)	CD ANEXO
Anexo B. Exploración de aguas subterráneas	CD ANEXO
Anexo C. Banco de datos de pozos de agua del INFOM	CD ANEXO
Anexo D. Términos indicativos de referencia para la construcción de pozos de agua	CD ANEXO
Anexo E. Calidad de agua	CD ANEXO
Anexo F. Listados de comunidades según potencial de aguas subterráneas	CD ANEXO
Anexo G. Mapas de calidad de agua	CD ANEXO

PERSONAL QUE PARTICIPÓ EN EL ESTUDIO:

Sergio David Morán Ical

Silvia Frine Cortez Bendfeldt

Boris Ottoniel Coy Choc

Deborah Dominique de León Robles

Jaime Eduardo Requena Fernández

Darlin María Sánchez Osejo

Sonia Marcela Lemus Alfaro

Jorge Eduardo Romero Gramajo

Glendy Victoria Petersen

Rudy Antonio Machorro Sagastume

APORTE DE INFORMACIÓN BÁSICA Y REVISIÓN

Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo UPGGR

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación MAGA

AGRADECIMIENTOS

Los resultados del presente estudio fueron posibles gracias a la colaboración de varias instituciones y profesionales que de manera diligente contribuyeron para la elaboración de los distintos productos.

La Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) aportó el financiamiento para la realización del presente estudio. Mario Aragón, Lina López y Karen Argueta también apoyaron la logística de las distintas actividades de investigación científica que permitieron la culminación exitosa del proyecto.

La Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo (UPGGR) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) a través del Dr. José Miguel Duro incidió notablemente en la gestión del proyecto y en el alcance exitoso de los objetivos del estudio. El Ingeniero Rovoham Monzón aportó información valiosa que permitió la construcción de los modelos de potencial de aguas subterráneas elaborados.

El Instituto de Fomento Municipal (INFOM) aportó los resultados de calidad de agua que son parte del informe así como datos de pozos de agua que permitieron la validación de parte de los resultados del estudio.

Los resultados del presente estudio son producto del esfuerzo sinérgico entre la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), la Asociación para el Manejo Sostenible de los Recursos Kársticos y Espeleológicos-ASOKARST- y CORDILLERA S.A.

RESUMEN EJECUTIVO

La evaluación del potencial de aguas subterránea de la República de Guatemala a escala de reconocimiento (1:250,000) constituye un esfuerzo integrado, multidisciplinario e interinstitucional, con el fin de apoyar el desarrollo del riego para la producción agrícola en comunidades de pequeños y medianos productores de todo el país.

El esfuerzo interinstitucional para la culminación de este proyecto se ha materializado mediante la participación de la *cooperación internacional* a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), el emprendimiento visionario del *sector público* a través de la Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo (UPGGR) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), el impulso del *sector académico* proveniente de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), el apoyo de la *sociedad civil* por medio de la Asociación para el Manejo Sostenible de los Recursos Kársticos y Espeleológicos (ASOKARST) y el involucramiento del *sector privado* a través de CORDILLERA S.A.

La determinación cuantitativa del potencial de aguas subterráneas de un área particular en cada departamento requiere evaluaciones detalladas de campo a nivel cualitativo y cuantitativo lo cual estuvo fuera del alcance de este estudio. Como parte de los resultados de este estudio se presentan los lineamientos principales que forman parte de una exploración formal de aguas subterráneas y que pueden servir de referencia para cualquier proyecto de desarrollo.

La metodología utilizada para la evaluación del potencial de aguas subterráneas de Guatemala puede resumirse de la siguiente manera. Se ha llevado a cabo el análisis integrado de los factores principales que controlan la existencia de agua subterránea en un área determinada, entre los cuales se encuentran los siguientes: a) tipos de rocas (litología), b) geomorfología, c) estructuras geológicas (lineamientos), d) lluvia, e) evapotranspiración, f) pendiente del terreno, g) densidad de corrientes fluviales y h) cuerpos acuáticos.

La mayoría de capas temáticas estuvieron disponibles por parte del MAGA. Las capas de lineamientos estructurales y de paisaje kárstico, particularmente la distribución espacial de dolinas, fueron generadas durante el presente estudio. Los análisis realizados incluye la distancia a estructuras geológicas y dolinas, interpretación de estructuras geológicas mediante geología regional y mecanismos focales, densidad de drenaje fluvial y derivación de pendientes y lineamientos estructurales a partir del modelo de elevación digital (MED).

Antes de llevar a cabo la integración de los bancos de datos se realizaron clasificaciones de mapas y el pesado de clases individuales mediante el Proceso Jerárquico Analítico (PJA) de Saaty. La zonificación del potencial de aguas subterráneas se ha realizado en base a la integración de distintos factores condicionantes previamente descritos tomando en cuenta la relevancia que cada factor puede tener para la circulación y el almacenamiento de aguas subterráneas.

Los diferentes tipos de rocas (litología), los lineamientos estructurales y la geomorfología fueron tomados en consideración como los factores principales que controlan la circulación y almacenamiento de agua subterránea. Se considera que los diferentes tipos de roca constituyen el factor principal ya que sus

propiedades físicas son una evidencia indirecta que definen si un área tiene potencial de agua subterránea bajo, medio o alto.

La geomorfología fue considerada como el segundo factor de importancia debido al hecho de que la infiltración del agua en el terreno depende de los tipos de suelos, sedimentos, relieve y vegetación. Los lineamientos estructurales constituyen normalmente el tercer factor de importancia que controla la circulación y almacenamiento de agua subterránea aunque en terrenos cristalinos puede considerarse un factor de extrema relevancia.

Los resultados del presente estudio constituyen una evaluación indicativa, teórica y preliminar del potencial de aguas subterráneas que presenta cada departamento. Los mapas pueden servir de apoyo en la planificación y diseño de un plan de desarrollo de aguas subterráneas ya sea a nivel departamental o municipal. Del mismo modo, los mapas se constituyen en instrumentos fundamentales para la selección y priorización de áreas para diseño y posterior implementación de proyectos de riego agrícola, particularmente apoyándose en las listas de comunidades con potencial de agua subterránea que se adjuntan en formato digital.

Para facilitar la socialización de los resultados del presente estudio, se ha adoptado una escala semafórica en los distintos mapas generados que muestra el potencial de aguas subterráneas de cada departamento analizado. La escala semafórica propuesta para el uso y aplicación de los mapas es la siguiente:

Ponderación	Potencial de Aguas Subterráneas
1	Muy Bajo
2	Bajo
3	Moderado
4	Alto
5	Muy Alto

Aunque el objetivo principal de la zonificación hidrogeológica realizada para cada departamento ha sido la elaboración de listados de comunidades conformadas por pequeños y medianos productores agrícolas con potencial para el desarrollo de proyectos de riego, los resultados del presente estudio pueden utilizarse también para otros proyectos de desarrollo incluyendo gestión de riesgos por sequías, apoyo a la seguridad alimentaria, manejo de áreas protegidas y abastecimiento de agua potable.

La complejidad geológica del país es manifiesta a las distintas escalas a que se realicen los estudios hidrogeológicos, desde el nivel local al regional. Para algunas regiones como la Planicie Costera del Pacífico no estuvo disponible un modelo geométrico sedimentario del aluvión así como tampoco existe información sobre las variaciones estructurales de la cuenca sedimentaria. Esto puede explicar las variaciones en el rendimiento de algunos pozos en varios órdenes de magnitud para la Planicie Costera del Pacífico, con un pozo en Retalhuleu reportando 30 gpm, algunos pozos en Masagua con un promedio de 120 gpm y pozos en La Gomera, Escuintla con 2,000 gpm.

En algunos sectores del norte de Ciudad de Guatemala se reportan variaciones de 900 gpm a 160 gpm en una distancia de 800 m entre los pozos, lo cual obedece a fuertes cambios estructurales y litológicos. Por la complejidad geológica de Guatemala, estos drásticos cambios en rendimiento de pozos de agua documentados para Ciudad de Guatemala y la Planicie Costera del Pacífico pueden ocurrir en cualquier otra región del país.

Debe tenerse presente que la evaluación de potencial de aguas subterráneas realizada es de carácter relativo. Esto significa que la escala de zonificación de potencial de aguas subterráneas de 5 categorías que se ha utilizado debe de emplearse con criterio. La categoría de potencial bajo (anaranjado) a muy bajo (rojo) no condena a dicho municipio, o cierto sector dentro del municipio, para la implementación de proyectos de desarrollo, ni implica que esta área carezca en lo absoluto de fuentes de agua subterránea. Lo que la categoría de potencial muy bajo posiblemente signifique es que el nivel de aguas subterráneas pueda encontrarse muy profundo y/o que el rendimiento del pozo que se construya posiblemente sea bajo (< 100 gpm). Las zonas geográficas con categorías de zonificación de potencial que varía de moderado (amarillo), a alto (verde) y muy alto (azul) son indicativas de que el potencial puede ser bastante aceptable para la implementación de proyectos de desarrollo.

El banco de datos de pozos de agua que se logró estructurar consta de datos para 54 pozos de agua proporcionados por el INFOM. El departamento que cuenta con mayor información de pozos de agua es Chimaltenango con 12 pozos, seguido de Totonicapán, Sololá y San Marcos con datos de 5 pozos de agua. Para departamentos como Alta Verapaz, Santa Rosa y El Progreso no se contó con datos de pozos de agua para la elaboración de los modelos de potencial de agua subterránea. De este modo, el único modelo de potencial de aguas subterráneas que cuenta con cierta validación con datos de pozos de agua es el modelo de la parte central de Chimaltenango. Los modelos de potencial de agua subterránea que se han generado para los restantes 21 departamentos están sujetos a validación futura con datos de pozos de agua.

Algunas de las preguntas que permanecen sin respuesta y que ameritan un enfoque cuantitativo basado en un extensivo banco de datos de pozos de agua, balance hídrico por lo menos mensual y mapeos hidrogeológicos a escala por lo menos 1:50,000 son las siguientes:

¿Cuál es el potencial cuantitativo de aguas subterráneas para cada departamento?

¿De este potencial, cuánto se está utilizando?

Se han identificado puntualmente acuíferos con dureza en terrenos carbonatados, incursiones salinas en acuíferos costeros, salinización en terrenos compuestos por yeso y/o anhidrita, contaminación natural de sodio y anomalías geotérmicas en zonas volcánicas (anexo E), por lo que se recomienda que durante la fase de exploración de cualquier proyecto de desarrollo se tomen muestras de calidad de agua.

Se recomienda la divulgación de los resultados del presente estudio ya que constituyen herramientas muy útiles para la evaluación, desarrollo y manejo de las aguas subterráneas del país. A futuro también es recomendable incorporar los resultados de próximas validaciones que fortalecerán la información generada.

CAPITULO I

DATOS GENERALES DEL ESTUDIO

1. Introducción

Las aguas subterráneas se constituyen en un recurso vital para el desarrollo rural y su estudio se considera importante debido a que en varias regiones del país, durante el verano, se secan la mayoría de las fuentes superficiales de agua que se utilizan para abastecimiento con fines de consumo humano y desarrollo agropecuario.

El presente estudio ha surgido como parte de un programa de desarrollo agrícola basado en riego para comunidades de pequeños y medianos productores en el occidente de Guatemala. Las actividades del programa se iniciaron durante el año 2008 y se extendieron para todo el país durante el año 2009.

La identificación, diseño, e implementación de proyectos de riego agrícola requiere contar como mínimo, con un contexto hidrogeológico departamental que permita seleccionar las comunidades con mayor potencial de aguas subterráneas.

En base a estos requerimientos se han llevado a cabo actividades de investigación científica para zonificar el potencial de aguas subterráneas de los 22 departamentos de Guatemala así como la integración de toda la información en un solo mapa a escala 1:250,000 que muestre el potencial de aguas subterráneas a nivel nacional. Para el caso del departamento de Petén se realizó la evaluación del potencial de aguas subterráneas también a nivel municipal.

2. Antecedentes

Los primeros estudios hidrogeológicos formales en Guatemala empezaron a llevarse a cabo durante la década de los 70's. El estudio de aguas subterráneas del valle de la Ciudad de Guatemala publicado hace 32 años¹ indica que hasta el año 1977 el valle registraba un total de 357 pozos mecánicos, 213 pozos en la cuenca sur y 143 pozos en la cuenca norte.

Los resultados de este estudio estaban orientados a evaluar los acuíferos del área con fines de abastecimiento urbano y aunque no detectaron anomalías de sobreexplotación merecen ser actualizados, particularmente por el desarrollo intensivo que han manifestado las aguas subterráneas en Ciudad de Guatemala.

A principios de la década de los 90's el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) elaboró el Plan Maestro de Riego y Drenaje (PMRD) cuyo componente de Hidrogeología² contiene una descripción generalizada sobre las aguas subterráneas de Guatemala y su potencial para riego. Como parte

¹ INSIVUMEH-IGN-ONU, 1978, Estudio de Aguas Subterráneas en el Valle de la Ciudad de Guatemala. 303 p.

² Zoppis, L., 1991, Plan Maestro de Riego y Drenaje, Documento No. 2. Hidrogeología. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. División de Estudios-Proyecto PNUD/OSP/GUA/88/003. 72 p.

de este estudio se utilizó el Mapa Geológico de Guatemala a escala 1:500,000 para identificar las Unidades Hidrogeológicas del país las cuales se resumen en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Regiones Hidrogeológicas de Guatemala

Región Hidrogeológica	Características
Llanuras Aluviales de la Costa del Pacífico	Están compuestas por depósitos aluviales Cuaternarios que se extienden a lo largo de la costa del Pacífico en una longitud de 260 km y ancho entre 10 y 60 km.
Altiplano Volcánico	Se localiza al norte de la Llanura del Pacífico a lo largo de una franja de 350 km de largo con un ancho entre 60 y 90 km. Está constituido por rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias, incluyendo derrames de lava y piroclastos. Algunos conos volcánicos todavía están activos.
Tierras Altas Cristalinas	Esta región se localiza al norte del Atiliplano Volcánico y está compuesta por una serie de cadenas montañosas (Chuacús, Las Minas, Merendón) delimitadas por la Zona de Falla del Motagua y del Polochic. Las formaciones geológicas presentes son rocas ígneas intrusivas, rocas metamórficas y algunos afloramientos pequeños de lutitas, areniscas y conglomerados.
Región Sedimentaria Septentrional	Esta zona ocupa el resto del país y se dividió en dos sub-regiones: las tierras altas sedimentarias (Sierra de Los Cuchumatanes, Sierra de Chamá, y Sierra de Santa Cruz) y la región sedimentaria de Petén. Las formaciones geológicas consisten principalmente de calizas Cretácicas en gran parte karstificadas, calizas Pérmicas, rocas sedimentarias clásticas, y algunos intrusivos en las Montañas Mayas.

Fuente: Zoppis (1991).

Como parte del PMRyD se realizó una evaluación del potencial de aguas subterráneas por cuenca hidrográfica del país utilizando la siguiente metodología: para cada Unidad Hidrogeológica que se muestra en el Cuadro 1.2 se realizó un balance hídrico con fines de caracterizar la cantidad de agua de lluvia que anualmente pueden infiltrarse y constituir la recarga del acuífero.

El territorio de Guatemala fue dividido en 38 cuencas hidrográficas y 3 vertientes. El mapa de Unidades Hidrogeológicas fue sobrepuerto al mapa de cuencas hidrográficas y tomando en cuenta la distribución de la precipitación media se realizó una evaluación indicativa, teórica y preliminar, del potencial de aguas subterráneas que presenta cada cuenca.

Los valores obtenidos para la cantidad de agua que puede infiltrarse en las distintas Unidades Hidrogeológicas son indicativos del potencial y no representan un valor absoluto más que para comparar el potencial de aguas subterráneas en cada cuenca.

Aunque al momento de elaborar el PMRyD no se contaba con los datos apropiados, se definió una Unidad Hidrogeológica de la siguiente manera: formaciones geológicas con características hidrodinámicas bastante homogéneas que permiten un comportamiento del agua más o menos constante, siempre a la escala considerada. La evaluación realizada sobre el mapa geológico de Guatemala a escala 1:500,000 permitió identificar 11 Unidades Hidrogeológicas las cuales se resumen en el Cuadro 1.2.

Cuadro 1.2. Unidades Hidrogeológicas identificadas para Guatemala por el PMRyD en base al Mapa Geológico a escala 1:500,000.

Unidad No.	Símbolo	Nombre	Características Generales
1	Qa	Aluviones Cuaternarios	Los depósitos más importantes se ubican en la costa del Pacífico. Están formados por gravas, arenas y arcillas provenientes de la erosión de la cadena volcánica. El espesor de los sedimentos es muy variable, alcanzando hasta 200 m en Escuintla sin haber interceptado la base. Algunos depósitos aluviales también se han desarrollado en los valles de algunos ríos del Altiplano Volcánico y de las Tierras Altas Cristalinas, con espesores de hasta 145 m.
2	Op	Piroclásticos Cuaternarios	Esta unidad está compuesta principalmente por pómex, lapilli y flujos de ceniza que se han acumulado en los valles del Altiplano, rellenando depresiones tectónicas. En el valle de Guatemala se reporta un espesor que alcanza más de 250 m. Para el valle de Quetzaltenango se reporta un espesor promedio entre 300 y 400 m pudiendo alcanzar hasta 1000 m en la parte más profunda de la caldera.
3	Qv	Lavas Cuaternarias	Se trata de lavas de composición basáltica, andesítica y riolítica derivadas de los conos activos. El espesor de las coladas y laharés intercalados es muy variable pudiendo alcanzar hasta 500 m. El potencial de aguas subterráneas en esta unidad está relacionado directamente con el grado de fracturamiento que presentan las lavas.
4	Tv	Lavas y Tobas Terciarias	Los depósitos incluyen lavas y tobas del Terciario Superior con espesores de varios cientos de metros. Esta unidad es de las más importantes en el Altiplano Volcánico con rendimientos que varían entre 4,000 y 8,000 gpm en El Ojo de Agua al sur de Ciudad de Guatemala. Los acuíferos frecuentemente están constituidos por andesitas con alto grado de fracturamiento.
5	Tsp, Tsd, Tic, Tpe.	Depósitos Sedimentarios Terciarios	En este grupo se incluyen formaciones sedimentarias que afloran en la parte más septentrional de Guatemala con un espesor que puede alcanzar hasta 6,000 m. La composición litológica es muy variable incluyendo estratos de arenisca, limolitas, margas, calizas y yeso.
6	KTsb, KTs	Depósitos Sedimentarios Cretácico-Terciarios	Esta unidad incluye sedimentos clásticos principalmente arcillosos y de baja permeabilidad que se presentan en la parte sur de Petén y el norte de Alta Verapaz los cuales pueden alcanzar un espesor de hasta 4000 m.
7	Ksd	Calizas y Dolomitas Cretácicas	Esta unidad considera los depósitos carbonatados con desarrollo de paisaje kárstico distribuidos en la parte central del país. La composición litológica varía de calizas arrecifales, dolomitas, brechas calcáreas y conglomerados calcáreos.
8	JKts	Depósitos Clásticos Jurásico-Cretácico	Los depósitos incluyen la Formación Todos Santos y San Ricardo que consisten principalmente de sedimentos arcillosos y limolitas rojas con intercalaciones de calizas y conglomerados, en espesores que varían de 400 a 500 m.
9	Pc	Calizas y Dolomitas Pérmicas	Se trata de la Formación Chochal que incluye calizas y dolomitas con intercalaciones de lutitas y un espesor que varía de 500 a 1000 m.
10	CPsr	Depósitos Clásticos Permo-Carboníferos	Esta unidad incluye el Grupo Santa Rosa el cual está compuesto por litologías clásticas que varían de lutitas, limolitas, pasando por areniscas y conglomerados.
11	I, Pzm, π	Rocas ígneas y metamórficas	Esta unidad incluye las rocas ígneas y metamórficas que forman parte de las Tierras Altas Cristalinas, incluyendo granitos, dioritas, peridotitas, gneises, esquistos, y filitas.

Fuente: Zoppis (1991).

Los resultados de este estudio establecen pautas para la toma de decisiones a nivel de cuenca. Sin embargo, no se alcanzaron resultados de zonificación hidrogeológica dentro de una misma cuenca lo cual puede impedir una selección apropiada de áreas para la implementación de proyectos de desarrollo.

La evaluación de aguas subterráneas más reciente a que se tuvo acceso lo constituye el estudio del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América³ cuyos resultados se sintetizan en el Cuadro 1.3.

Cuadro 1.3. Resumen de la evaluación de aguas subterráneas de Guatemala realizada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América (2,000)

Unidad de Acuíferos	Características de los acuíferos	Hidráulica de acuíferos	Otras observaciones
1. Aluvión Cuaternario en la Planicie Costera del Pacífico, Valle del Motagua, Valle del Polochic, y Norte de Petén	Aluvión Cuaternario compuesto por arenas y grava interestratificada con arcillas. En algunos lugares de Escuintla el espesor del aluvión puede alcanzar hasta 200 m.	18 pozos de Escuintla muestran un rango de producción entre 158 y 792 gpm. Las transmisividades en el aluvión del Pacífico varían de 150 a 2,000 m ² /día.	En el Pacífico las profundidades del nivel estático varían de 1 a 6 m. El nivel dinámico se localiza entre 10 y 30 m. Algunos acuíferos someros son vulnerables a la contaminación biológica y por pesticidas.
2. Acuíferos kársticos	Calizas kársticas en Petén, sierra de los Cuchumatanes y Sierra de Chamá	No se reportan datos específicos.	Presencia de aguas duras derivadas de las calizas. Ocasional salinidad derivada de estratos de yeso. Contaminación biológica por infiltración en dolinas y cavernas.
3. Rocas Volcánicas	Piroclásticos y lavas Terciarias y Cuaternarias. El fracturamiento en las andesitas ha incrementado notablemente la permeabilidad.	Pozos en el Valle de Quetzaltenango reportan entre 317 y 792 gpm. Algunos pozos entre Ipala y Suchitán producen entre 237 y 634 gpm. En el Valle de Guatemala se reportan rendimientos de algunos pozos entre 3,962 y 7,925 gpm para el Ojo de Agua en Villa Nueva. La zona de menor rendimiento se identificó al norte de Ciudad de Guatemala con caudales entre 30 y 300 gpm. Para el año 1995 EMPAGUA administraba 121 pozos.	Para el Valle de Ipala el nivel dinámico varía entre 35 y 90 m. Un pozo en el Hospital Roosevelt presentaba concentraciones anómalas de SO ₄ ²⁻ (256 mg/l).
4. Acuíferos Cristalinos	Rocas ígneas intrusivas y metamórficas en la parte central del país.	No se reportan datos específicos.	

³ Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, 2000, Evaluación de Recursos de Agua de Guatemala. 106 p.

5. Acuíferos Clásticos	Rocas clásicas Cretácicas y Terciarias al norte de Petén y en el centro del país	Un pozo en Livingston reporta 95 gpm.	
6. Sedimentos Cuaternarios costeros	Sedimentos en la línea de costa del Océano Pacífico y el Caribe.	No se reportan datos específicos.	Se reporta agua salada alojada en los sedimentos. Esta agua salada puede contaminar los acuíferos de agua fresca, si ocurren ambientes de sobreexplotación.

3. Objetivos del estudio de potencial de aguas subterráneas

3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo hidrogeológico para cada uno de los 22 departamentos de Guatemala los cuales permitan evaluar y zonificar el potencial de aguas subterráneas en cada departamento e integrar los resultados a nivel nacional, de modo que se genere un instrumento que permita contribuir a la planificación de la agricultura y ganadería de todo el país.

3.2. Objetivos específicos

- Ampliar la información básica existente para la generación de los mapas de potencial de aguas subterráneas, incluyendo mapas departamentales de lineamientos estructurales y distribución espacial de dolinas.
- Integración de los mapas de lineamientos estructurales y de distribución espacial de dolinas con información temática existente sobre variables hidrogeológicas tal como lluvia, red fluvial, evapotranspiración para zonificar el potencial de aguas subterráneas de cada departamento.
- Llevar a cabo la calibración de los modelos de potencial de aguas subterráneas utilizando para ello los datos de pozos de agua que estén disponibles.
- Elaborar un banco de datos de calidad de agua con fines de calidad de agua para proyectos de riego agrícola y mostrar las variaciones espaciales por parámetro de calidad de agua, identificando áreas con valores anómalos.

- En función de la zonificación hidrogeológica realizada, identificar las comunidades por departamento que presentan aptitud hidrogeológica para la implementación de proyectos de riego agrícola, aportando listados departamentales de comunidades.
- Capacitar a técnicos del Laboratorio SIG del MAGA acerca de la construcción de modelos de potencial de agua subterránea utilizando para ello los resultados obtenidos durante el presente estudio.

CAPITULO II

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

2.1. Aspectos metodológicos generales para la evaluación de aguas subterráneas

La distribución desigual de la lluvia en el espacio y en el tiempo ocasiona que los recursos hídricos también tengan una distribución irregular. Estas características demandan que el desarrollo de los recursos hídricos sea planificado y optimizado, tomando en consideración un uso conjunto de agua superficial y agua subterránea.

El desarrollo sostenible de los recursos hídricos solo puede lograrse mediante una estimación cuantitativa de los recursos disponibles. Es necesario que los reservorios de agua subterránea se mantengan en un estado de equilibrio dinámico y que las fluctuaciones de los niveles de agua subterránea no cambien drásticamente.

Es necesario contar por lo tanto con una evaluación científica del potencial de aguas subterráneas la cual también tome en cuenta la calidad del agua subterránea así como la viabilidad económica para su extracción, teniendo cuidado de no exceder el ritmo de recarga de la zona así como también que se asegure la equidad social.

La evaluación precisa de recarga y descarga resulta frecuentemente difícil ya que las técnicas para medición directa de estos procesos hidrogeológicos no suelen estar disponibles en países como Guatemala. La evaluación cuantitativa de las aguas subterráneas requiere también un entendimiento adecuado de las propiedades físicas de los acuíferos, particularmente transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Estos dos parámetros frecuentemente son difíciles de establecer en nuestro país, particularmente por la ausencia de pozos de monitoreo de aguas subterráneas.

Los resultados de evaluación de aguas subterráneas se han obtenido frecuentemente con un enfoque de cuenca hidrográfica donde normalmente la cuenca de aguas subterráneas⁴ se puede caracterizar mediante la red fluvial dominante. Este es el caso más simplificado, donde la cuenca hidrográfica coincide exactamente con la cuenca de aguas subterráneas, lo cual frecuentemente ocurre en ámbitos dominados por rocas cristalinas ya sean rocas ígneas intrusivas y/o rocas metamórficas.

Sin embargo, el límite de una cuenca de aguas subterráneas está controlado frecuentemente no solo por la topografía, como es el caso de una cuenca hidrográfica compuesta por rocas cristalinas, sino también por la extensión espacial tri-dimensional de las unidades litológicas y por la geología estructural de la zona.

El caso de mayor complejidad lo constituye un terreno kárstico donde a menos que se cuente con una caracterización detallada del paisaje kárstico y con pruebas de trazadores hidrogeoquímicos no puede delimitarse correctamente una cuenca de aguas subterráneas.

⁴Una *cuenca de aguas subterráneas* consiste ya sea de un único acuífero o de un grupo de acuíferos dependiendo de las características geológicas y fisiográficas de la zona.

La mayoría de métodos que se utilizan para evaluar los recursos de aguas subterráneas se basan generalmente en técnicas de balance hídrico.

La metodología más precisa para estimar el potencial de aguas subterráneas de una región consiste en la medición de fluctuación de niveles de agua subterránea. Sin embargo, en áreas donde el monitoreo de niveles de aguas subterráneas no se realiza de manera sistemática, o donde datos adecuados acerca de la fluctuación de aguas subterráneas no están disponibles, frecuentemente se adopta el enfoque de infiltración de agua de lluvia utilizado por el PMRyD para estimar recarga.

Por lo tanto, normalmente los métodos que se utilizan para la evaluación de aguas subterráneas son frecuentemente indirectos.

2.2. Enfoque metodológico adoptado para la evaluación del potencial de aguas subterráneas

La unidad frecuentemente utilizada para la evaluación de aguas subterráneas es la cuenca. La evaluación realizada en la cuenca puede trasladarse a otras unidades de planificación como una región, departamento o municipio.

Sin embargo, en la presente investigación se adoptó el enfoque espacial de evaluación de aguas subterráneas por departamento. Esto se debe a que ya se tenían priorizados ciertos departamentos del occidente del país en base al potencial de riego agrícola previamente establecido. Para el caso de Petén, la zonificación territorial del potencial de aguas subterráneas se realizó por municipio.

De este modo el departamento fue considerado como la unidad básica de evaluación de potencial de aguas subterráneas. Cada departamento fue evaluado de manera separada y luego se agregó el potencial de cada departamento para obtener la zonificación global del potencial de aguas subterráneas para todo el país. La transformación de escalas para varios procesos hidrogeológicos puede ser una tarea sumamente compleja. El lector interesado en examinar el trabajo con y entre distintas escalas puede consultar el Anexo B.

No existen métodos directos que permitan la observación del agua por debajo de la superficie. La presencia o ausencia de agua subterránea puede inferirse únicamente de manera indirecta mediante el estudio de elementos geológicos y superficiales.

Aun y cuando las aguas subterráneas constituyen un fenómeno que se manifiesta por debajo de la superficie se ha demostrado que el estudio de fotos aéreas y la integración de diferentes mapas temáticos contribuyen notablemente a la exploración sistemática y eficiente de los acuíferos.

Sin embargo, frecuentemente la mayor cantidad de información sobre aguas subterráneas se obtiene mediante razonamientos cualitativos y enfoques semi-cuantitativos, sobre todo en los casos donde no se cuenta con datos de pozos de agua, como sucede en gran parte del país.

Algunos de los factores que controlan la existencia de agua subterránea en un área determinada son los siguientes: a) tipos de rocas (litología), b) geomorfología, c) estructuras geológicas (lineamientos), d) lluvia, e) evapotranspiración, f) pendiente del terreno, g) densidad de corrientes fluviales, h) uso de la tierra y i) tipos de suelos.

El análisis integrado de estos factores contribuye notablemente a la identificación y delimitación de zonas potenciales de agua subterránea. La integración de estos factores ayuda a delimitar áreas objetivo donde se pueden llevar a cabo levantamientos geofísicos y mapeos hidrogeológicos detallados en el terreno (Anexo C) de modo que finalmente se seleccione áreas para el desarrollo sostenible de aguas subterráneas.

La metodología utilizada para la integración de los factores principales que pueden incidir notablemente en el potencial de aguas subterráneas se muestra en la Figura 2.1. La mayoría de capas temáticas fueron facilitadas por parte del MAGA. Las capas de lineamientos estructurales y de paisaje kárstico, particularmente la distribución espacial de dolinas, fueron generadas durante el presente estudio.

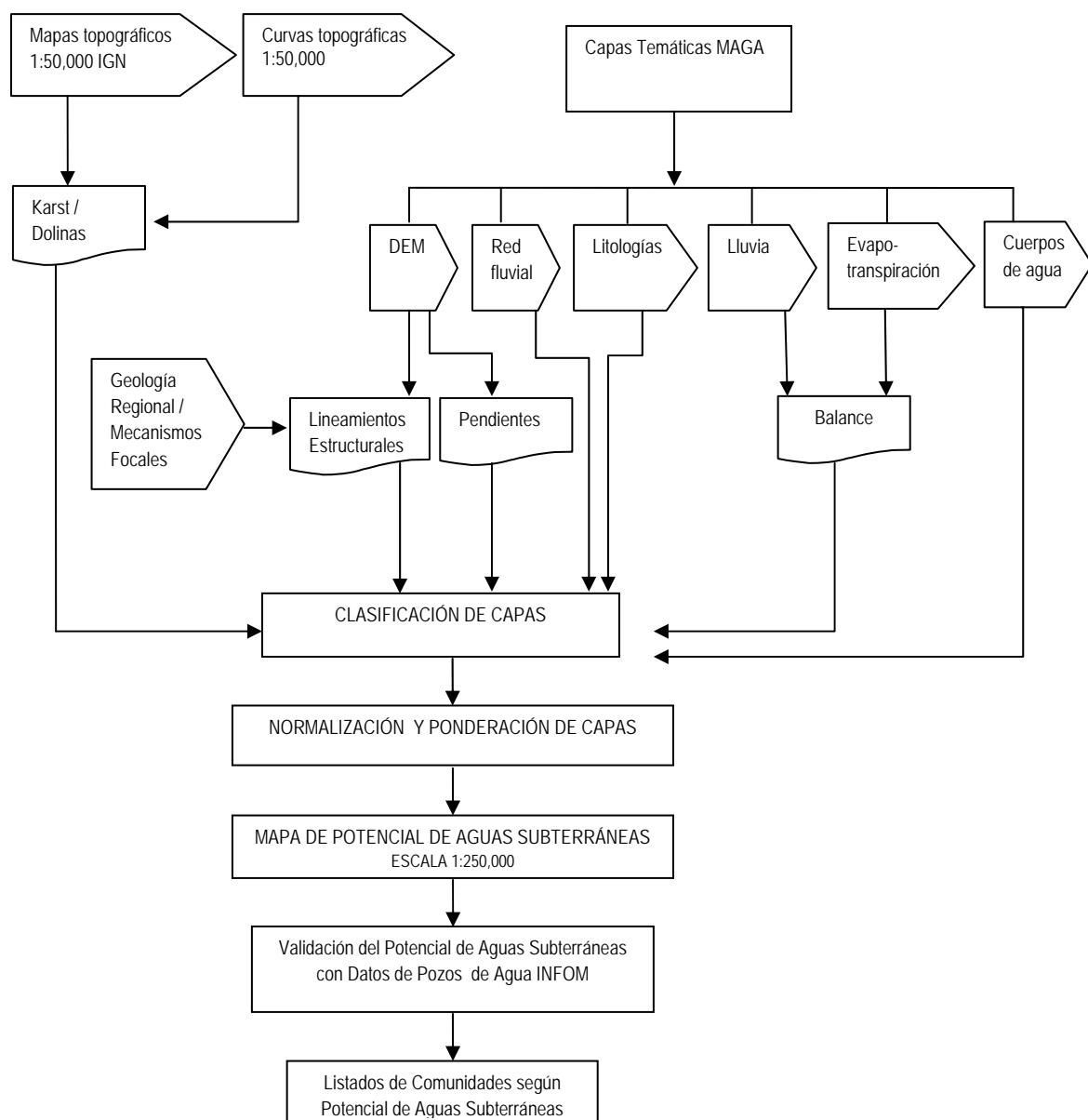


Figura 2.1. Metodología utilizada en el estudio para la evaluación del potencial de aguas subterráneas.

Los análisis realizados incluyen siete capas temáticas: estructuras geológicas (derivados del modelo de elevación digital –DEM y su mapa de sombras), densidad de rasgos cársticos (dolinas y uvalas), densidad de drenaje fluvial, pendientes (derivadas del DEM), tipo de roca (litológia), balance (lluvia – evapotranspiración) y cuerpos de agua.

Se realizó la clasificación de cada mapa temático en 5 categorías, el análisis de álgebra de mapas y la ponderación-normalización de los factores condicionantes, adoptando la evaluación multicriterio para identificar y delimitar diferentes zonas de potencial de aguas subterráneas. Antes de llevar a cabo la integración de los bancos de datos se realizaron clasificaciones de mapas y el pesado de clases individuales mediante el Proceso Jerárquico Analítico (PJA) propuesto por Saaty⁵.

En el método Saaty (Cuadro 2.1) la importancia relativa de cada clase individual en el mismo mapa se compara una con otra mediante pares por lo que en el presente estudio se generaron siete matrices para la asignación de pesos a cada clase.

Cuadro 2.1. Escala de Clasificación Continua desarrollada por Saaty (1980)

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Muy fuerte	Fuerte	Moderada	Igual	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Extrema
Menos importante					Más Importante			

A continuación se presenta una descripción de los factores que se considera tienen una influencia significativa en el almacenamiento y circulación de aguas subterráneas. También se indica el procedimiento utilizado para la integración de estos factores con fines de la identificación y delimitación de zonas con diferente potencial de aguas subterráneas.

2.2.1. Densidad de Drenaje Fluvial

El sistema de drenaje fluvial existente en un área determinada refleja los tipos de rocas (litologías) y estructuras geológicas que predominan. Las redes de drenaje para cada departamento fueron obtenidas de la base de datos del MAGA a escala 1:50.000.

En relación con la zonificación del potencial de aguas subterráneas se consideró que las zonas con alta densidad de drenaje indicaban menor infiltración de agua hacia los reservorios subsuperficiales. La comparación de pares realizada en base a esta relación (Cuadro 2.2) muestra que para las áreas con menor densidad de drenaje se asignó un peso más alto y viceversa.

⁵ Saaty, T., 1980, The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill. 437 p.

Cuadro 2.2. Pesos indicativos para los mapas de densidad de drenaje fluvial asignados en Alta Verapaz.

	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto
Densidad (radio de 1,000 m)	0.00083	0.0016	0.0025	0.0033	0.00416
Peso	1	2	3	4	5

La asignación de pesos a las diferentes categorías de densidad de drenaje permitió elaborar un mapa de drenaje fluvial reclasificado.

2.2.2. Análisis de Pendientes del Terreno

Debido a que la pendiente del terreno juega un papel importante en las condiciones hidrogeológicas se preparó un mapa de pendientes derivado del modelo de elevación digital.

En relación con la zonificación del potencial de aguas subterráneas se consideró que las áreas planas o de baja pendiente eran capaces de almacenar el agua de lluvia lo cual a su vez facilita la recarga de los acuíferos subsuperficiales. Para las áreas de alta pendiente se consideró que los procesos hidrogeológicos dominantes era la escorrentía y la infiltración baja.

Para la clasificación de pendientes se utilizaron los rangos que se indican en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Clases de pendientes y pesos asignados en Alta Verapaz.

Clase de Pendiente	Pendiente en Grados	Categoría de Pendiente
1	34.64 – 73.61	Muy alta
2	25.11 – 34.64	Alta
3	16.16 – 25.11	Moderada
4	6.9 – 16.16	Baja
5	0 - 6.9	Muy baja

La comparación en pares realizada y los pesos calculados para el ángulo de pendiente (Cuadro 2.4) se basaron en el hecho de que la topografía más plana es la que presenta las mayores probabilidades de acumular agua subterránea. En base a los pesos calculados se generó un mapa reclasificado de pendientes.

Cuadro 2.4. Pesos asignados a los mapas de pendientes

	Plano	Suave	Moderado	Pronunciado	Muy Pronunciado	Peso	Peso %
Plano	1						50
Suave	1/3	1					27
Moderado	1/4		1			0.x	14
Pronunciado	1/7			1		0.y	6
Muy pronunciado	1/9				1	0.z	3

2.2.3. Lluvia Anual

La lluvia es una de las fuentes principales de agua subterránea. Sin embargo, la relación de lluvia con el agua subterránea depende de varios factores como la topografía, la vegetación y la geología superficial los cuales afectan al cantidad de agua que puede alcanzar el reservorio del subsuelo.

Puede considerarse que casi toda la lluvia que cae en un terreno compuesto por aluvión arenoso es absorbido por el mismo. En general se considera que las zonas con altas cantidades de lluvia implican un alto potencial de agua subterránea.

La comparación de pares se realizó tomando en consideración los planteamientos expuestos con los pesos calculados según muestra el Cuadro 2.5 los cuales sirvieron de base para producir el mapa reclasificado de lluvia.

Cuadro 2.5. Pesos asignados a los mapas de lluvia anual

	Alto	Moderado	Bajo	Peso	Peso %
Alto	1			0.6694	67
Moderado	1/3	1		0.2426	24
Bajo	1/7	1/3	1	0.0879	9

En términos de balance hídrico se integraron los datos de lluvia con los datos de la capa de evapotranspiración mediante el análisis de álgebra de mapas. A través de este análisis se ha interpretado la cantidad de agua disponible para el sistema subterráneo, restando la evapotranspiración a la cantidad de lluvia que entra al sistema. El Cuadro 2.6 muestra la clasificación de los resultados obtenidos.

Cuadro 2.6. Clasificación de precipitación menos evapotranspiración

Clase	Precipitación - Evapotranspiración	Categoría
1	-809.8 - 322	Muy alta
2	322 - 850	Alta
3	850 - 1362	Moderada
4	1362 - 2091	Baja
5	2091 - 3146	Muy baja

2.2.4. Lineamientos Estructurales

Los lineamientos estructurales son rasgos lineares cartografiados en la superficie de la tierra y derivados del paisaje tal como ríos, escarpes y alineamiento de cordilleras que pueden ser la expresión superficial de zonas de fractura y/o zonas de falla extensionales a lo largo de las cuales puede circular el agua subterránea.

El mapeo de lineamientos estructurales es una actividad bastante utilizada en la exploración de aguas subterráneas⁶. Esto se debe a que los lineamientos frecuentemente son resultado de fallas y fracturas por lo que normalmente representan un incremento en porosidad y permeabilidad de las rocas.

Los lineamientos estructurales pueden mapearse a partir de fotos aéreas, imágenes de satélite y de las sombras (hillshade) obtenidas del modelo de elevación digital (MED). La identificación de lineamientos se realiza en base a cambios abruptos de pendientes, truncado de terrazas fluviales, cambios abruptos en el curso de un río, cambios de litología, cambios de vegetación, contrastes de textura y densidad de drenaje.

La base utilizada para identificar y generar los lineamientos fue el modelo de elevación digital de Guatemala con resolución vertical de 20 m (Figura 2.2). En el caso de algunos sectores que muestran topografía plana, se tuvo la oportunidad de obtener información de análisis previos hechos a través de imágenes de radar, los cuales se incluyeron para enriquecer la información.

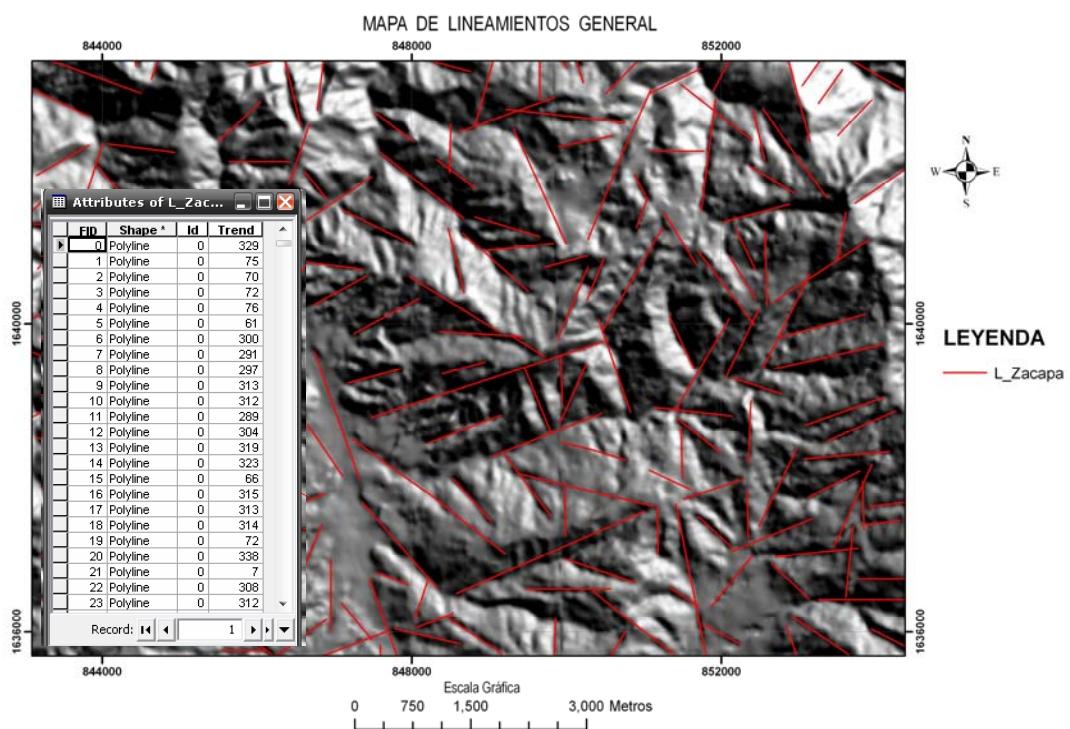


Figura 2.2. Vectorización de los rasgos lineales (lineamientos estructurales), obtenidos mediante el análisis de modelo de elevación digital (MED). La tabla de atributos inserta muestra que cada rasgo vectorizado posee su propio valor de dirección (azimutal).

⁶ La utilización pionera de lineamientos estructurales en la exploración de aguas subterráneas proviene de Lattman, L., Parizek, R., 1964, Relationship between fracture traces and the occurrence of ground water in carbonate rocks: Journal of Hydrology, v. 2, p. 73-91. Una revisión más reciente del uso de lineamientos estructurales se encuentra en Sander, P., 2007, lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations: Hydrogeology Journal, v. 15, p. 71-74.

Se trazaron uno a uno cada rasgo lineal visible y se llevó a cabo la obtención de la dirección (azimut) de cada lineamiento para luego introducir estos valores a tablas de atributos. Los cuadrantes utilizados fueron 0-90° y de 270-360°. Para obtener los datos acordes de dirección (Trend) se elaboró una plantilla (transportador), cuya graduación varió cada 5 grados.

La Figura 2.3 muestra el mapa de lineamientos estructurales para el departamento de Jalapa. Para el análisis de lineamientos en relación con las zonas prospectivas por aguas subterráneas, se realizó el cálculo de la orientación de los tensores de esfuerzos con base a datos de mecanismos focales que estuvieran disponibles principalmente de Guatemala como de áreas aledañas. Un mecanismo focal representa la distribución de las dilataciones y compresiones del movimiento de las partículas según un modelo de doble par de fuerzas en una esfera unitaria mediante proyección estereográfica.

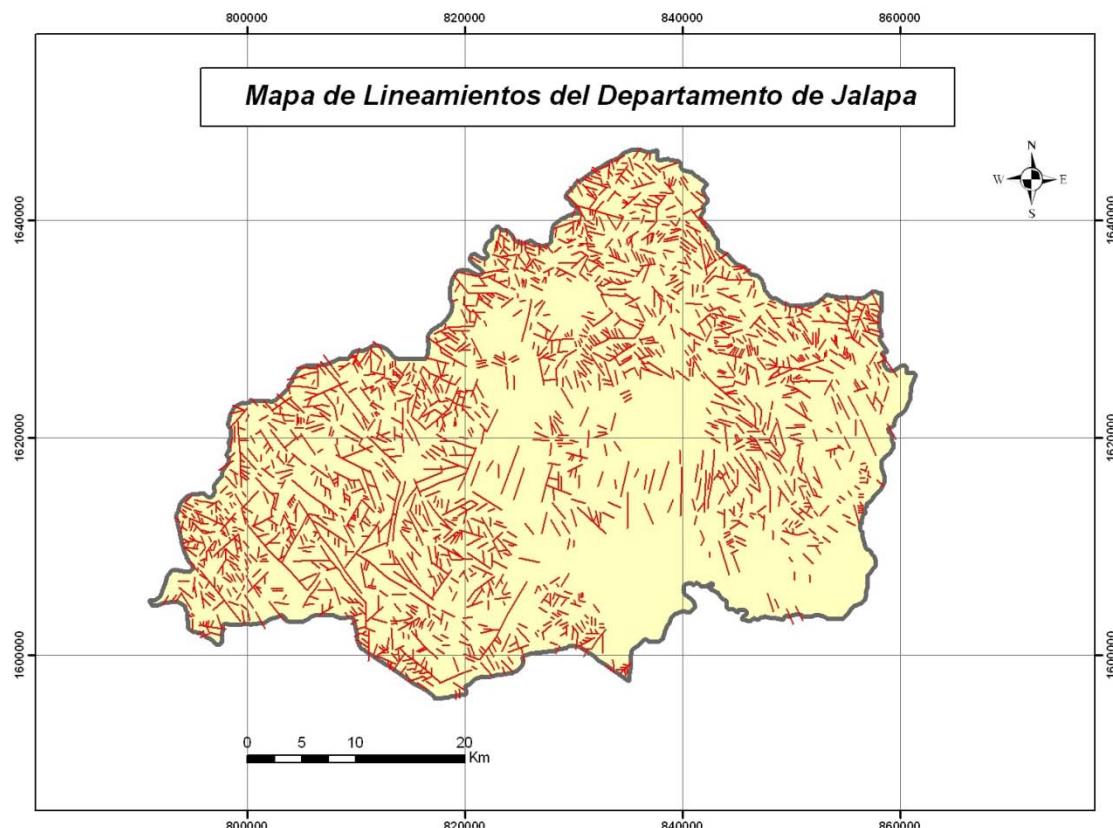


Figura 2.3. Mapa de lineamientos estructurales para el departamento de Jalapa.

Para ello se consultaron varios catálogos sísmicos disponibles, siendo los más importantes los siguientes:

- Catálogo sísmico de Harvard (Centroid-Moment Tensor)
- Catálogo sísmico de la USGS (NEC)
- Datos obtenidos del World Stress Map (WSM)
- Catálogo regional sísmico del ISC (International Seismological Center)

Los datos obtenidos de estos catálogos ayudaron a generar los gráficos de mecanismos focales (Figura 2.4) y determinar con ello la dirección de los ejes de deformación (σ_1 , σ_2 , σ_3). Además, se registró en un mapa base (plataforma), los diferentes epicentros de cada sismo, con el objeto de visualizar su distribución espacial.

Para el diagrama de la derecha de la Figura 2.4 se observa la representación de la dirección (línea discontinua) de un rasgo natural (lineamiento) el cual está paralelo a la dirección de esfuerzo máximo (σ_1 ó P). Otro aspecto importante, es que solo se trabajaron los mecanismos focales cuyo origen (hipocentro) estuviera a una profundidad <55km.



Figura 2.4. Elementos de un mecanismo focal, que corresponde a una falla de rumbo (desgarre). El esfuerzo σ_1 corresponde al eje de máximo acortamiento (compresión). En el caso de σ_3 , es lo contrario, corresponde al eje de máxima elongación (Tensión y/o dilatación)

Por otro lado, los resultados de la interpretación de mecanismos focales fue complementada con el conocimiento disponible de geología regional, atendiendo a la distribución espacial de estructuras regionales como el graben de Ipala y los sistemas de Falla de Motagua, Polochic y Jalpatagua.

Conociendo la distribución espacial y orientación tanto del esfuerzo máximo, intermedio y mínimo (σ_1 , σ_2 , σ_3) respectivamente, se procedió a zonificar o dividir en sectores todo el país (Figura 2.5). Cada sector representa la dirección (rumbo) media de esfuerzo máximo ($\sigma_1 = P$) obtenida mediante los mecanismos focales.

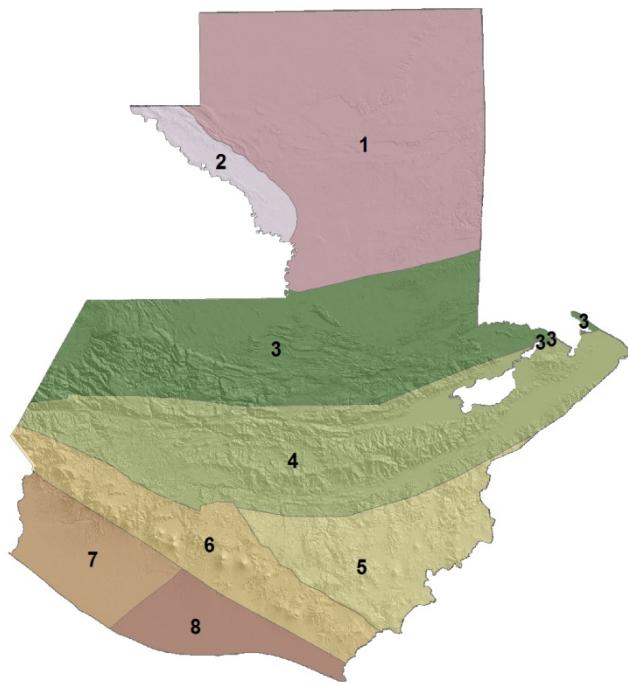


Figura 2.5. Principales zonas o sectores delimitados mediante los resultados obtenidos de las principales direcciones de esfuerzo (σ_1), utilizando los datos de mecanismos focales.

Luego de haber obtenido para cada uno de los diferentes sectores la dirección del esfuerzo máximo (σ_1), se elaboró un modelo estructural para cada sector, representando las principales estructuras, como se visualiza en la Figura 2.6 en donde las fracturas Riedel (R-R') y Skampton (P), son de cizalla (fallas de rumbo) y en línea discontinua (azul) está representada la dirección de las fracturas de tensión (fallas normales). Paralelas a la flecha en negro, siempre de la misma figura, se ubicaría la traza de fallas inversas.

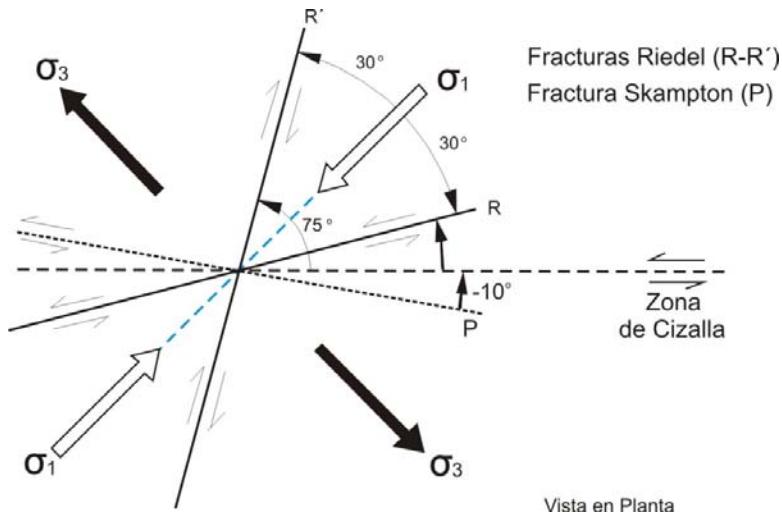


Figura 2.6. Modelo estructural que ejemplifica las relaciones geométricas entre las principales fracturas.

Considerando las relaciones geométricas entre estructuras (Figura 2.6), se llevó a cabo una ponderación de 1 a 5. Se ponderó con el valor de 5, para aquellos lineamientos que estuvieran paralelos o semi-paralelos a la dirección de esfuerzo máximo (σ_1) y para los lineamientos que tuvieran dirección y estuvieran paralelos al esfuerzo mínimo (σ_3), se les ha ponderado con valor de 1.

Se trabajó con el criterio de que las estructuras o lineamientos que tienen una dirección paralela a σ_1 son las que presentan mejor potencial para la circulación y almacenamiento de agua subterránea y las que se encuentran paralelas a σ_3 , son las que poseen el menor potencial.

Para el análisis de lineamientos en relación con las zonas prospectivas por aguas subterráneas, se realizó un mapa a nivel nacional que muestra las orientaciones de las zonas de deformación en los distintos sectores; deduciendo de aquí, cinco orientaciones de fracturas que favorecen o no, el potencial para almacenar agua. Así, se generaron mapas de densidad de lineamientos, correspondientes a 5 clases que se muestran en el Cuadro 2.7.

Sector	Dirección de lineamiento	Ponderación	Orientación de deformación
1	N20-50	5	N35
	N05-20	4	
	N50-65		
	N65-95 (N275)	3	
	N335-05		
	N275-290	2	
2	N320-335		N15
	N290-320	1	
	N360-30	5	
	N30-45	4	
	N345-360		
	N315-345	3	
3 y 4	N045-N75		N45
	N075-090	2	
	N300-315		
	N270-300	1	
	N30-59	5	
	N15-29	4	
5	N60-74		N15
	N75-104 (N285)	3	
	N345-14		
	N330-344	2	
	N285-299		
	N300-329	1	
6, 7 y 8	N000-29	5	N320
	N30-44	4	
	N345-359		
	N315-344	3	
	N045-N74		
	N075-089	2	

Cuadro 2.7. Pesos asignados a las distintas orientaciones de lineamientos, dependiendo del sector de deformación en que se sitúan a nivel nacional.

2.2.5. Geomorfología

La geomorfología juega un papel significativo en la identificación de zonas favorables para la acumulación de aguas subterráneas. Las zonas más prometedoras de aguas subterráneas frecuentemente se localizan en planicies de inundación, abanicos aluviales y en sedimentos que rellenan cuencas estructurales.

Debido a que gran parte del país tiene paisaje kárstico se llevaron a cabo actividades para identificar y delimitar la distribución espacial de dolinas (depresiones kársticas conocidas como siguanes en Alta Verapaz), para cada departamento. La Figura 2.7⁷ ilustra las principales características del paisaje kárstico de las cuales se realizó una evaluación sistemática de dolinas para todo el país.

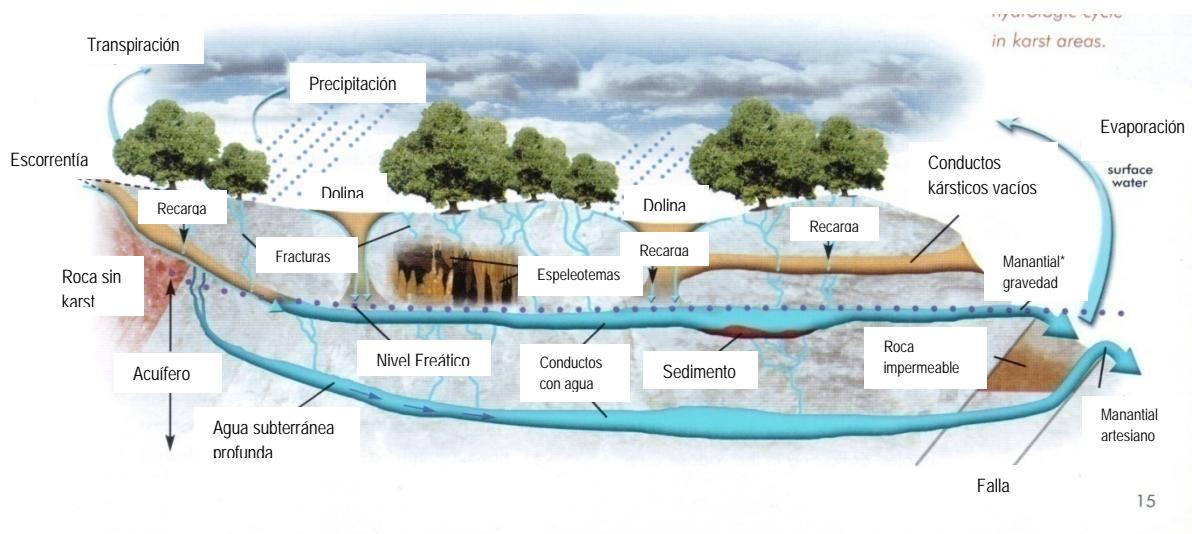


Figura 2.7. Diagrama que muestra las características generales de los acuíferos kársticos. Fuente: Veni y otros (2001).

Durante el presente estudio se realizó un inventario preliminar de dolinas a escala 1:50,000. La Figura 2.8 muestra la distribución espacial de dolinas para el departamento de Huehuetenango.

⁷ Veni, G., DuChene, H., Crawford, N., Groves, C., Huppert, G., Kastning, E., Olson, R., and Wheeler, B., 2001, Living with Karst: A Fragile Foundation. American Geological Institute and National Speleological Society. 66 p.

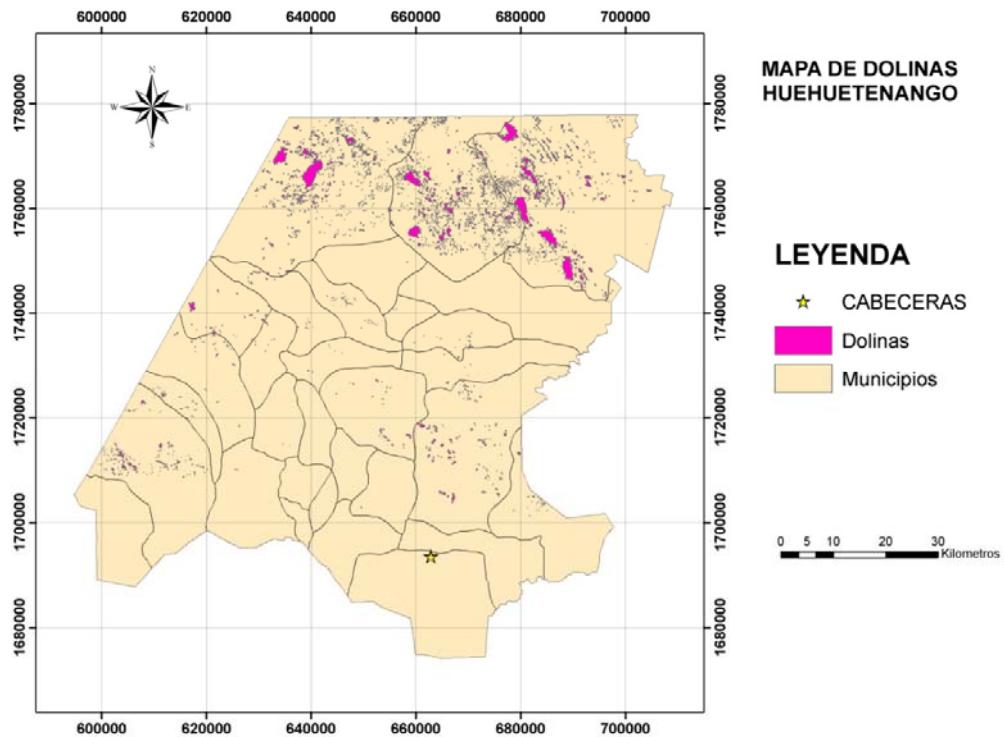


Figura 2.8. Mapa que muestra la distribución espacial de dolinas para el departamento de Huehuetenango.

Tal y como puede notarse, la mayor densidad espacial de dolinas y las uvalas que se forman al unirse varias dolinas, se concentran al norte del departamento. Existen sectores con menor desarrollo kárstico al centro y sur del departamento. Tanto las dolinas como las uvalas constituyen zonas por excelencia de recarga hídrica, siendo al mismo tiempo conductos que permiten fácil comunicación entre el agua superficial y el agua subterránea y haciendo que los acuíferos kársticos sean altamente vulnerables a la contaminación.

Del mapa de distribución de rasgos kársticos (dolinas y uvalas) se obtuvieron los centroides de dichas estructuras, para poder realizar el mapa de densidad de rasgos kársticos. La clasificación de la densidad de dolinas se realizó en base a los rangos que se muestran en el Cuadro 2.8.

Cuadro 2.8. Pesos asignados en base a la densidad de dolinas y uvalas, en el departamento de Huehuetenango.

Clase	Dolinas en radio de 1000 m	Categoría	Pesos
1	0 – 1	Muy baja	1
2	1 – 5	Baja	2
3	5 – 10	Moderada	3
4	10 – 15	Alta	4
5	15 – 26	Muy alta	5

2.2.6. Tipos de rocas (Litología)

Los diferentes tipos de rocas tienen un papel sumamente significativo en la circulación y almacenamiento de aguas subterráneas. Se utilizó la capa de tipos de rocas disponible (Laboratorio SIG – MAGA, 2009) donde se muestra los tipos de roca dominantes en cada departamento. Se asignaron pesos según el potencial de agua subterránea de cada litología lo cual se muestra de manera indicativa para el departamento de Chiquimula (Figura 2.9) en el Cuadro 2.9.

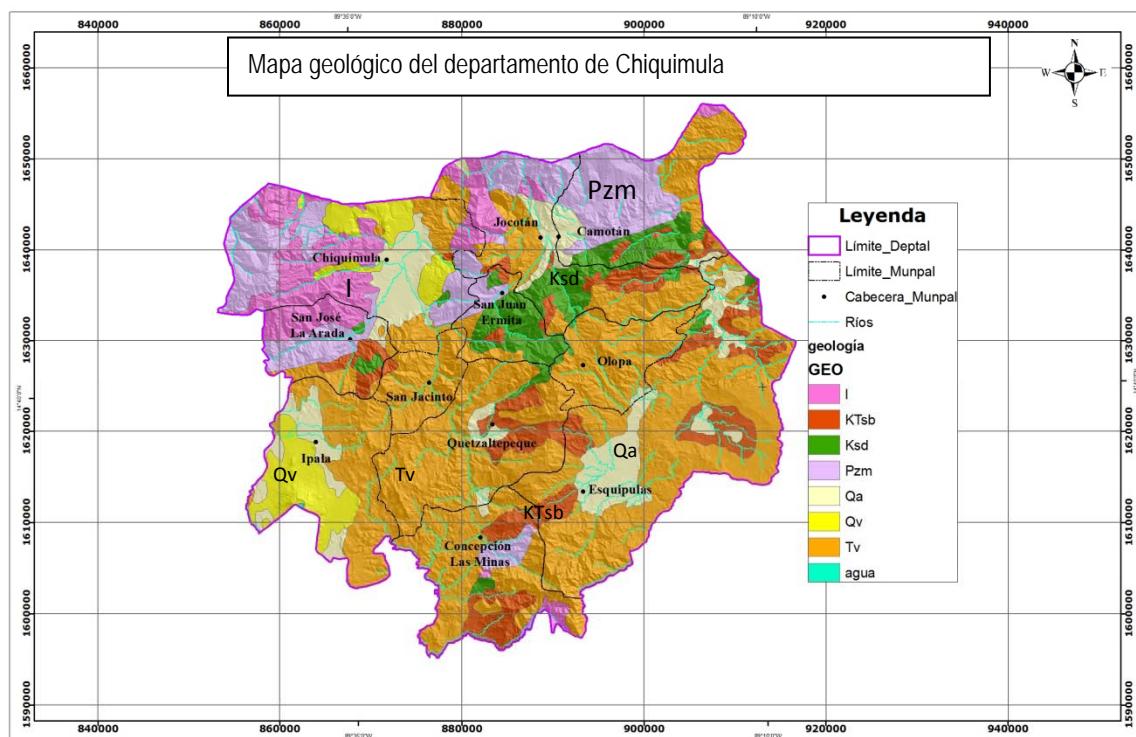


Figura 2.9. Mapa que muestra las principales unidades litológicas de Chiquimula.

Cuadro 2.9. Pesos para las litologías del departamento de Chiquimula

Dept/o/ Litología	Qa (Aluviones Cuaternarios)	Agua	Ksd (Carbonatos Cretácicos)	I (Intrusivos)	Pzm (Metamorficas, Paleozoicas)	Qv (Volcánicos Cuaternarios)	Tv (Volcánicos Terciarios)	KTsb (Clásicos, Formación Subinal, Cretácico/Terciario)
Chiquimula	4	5	4	1	1	3	3	4

Los tipos de litologías pueden variar ampliamente por departamento de modo que se utilizaron matrices distintas según las rocas existentes.

2.2.7. Cuerpos de agua

La integración de los cuerpos de agua para la estimación del potencial de aguas subterráneas presentó desafíos complejos debido a que la mayoría de cuencas lacustres están alojadas en zonas con geología sumamente variada, como puede ser el caso del Lago de Izabal y el Lago Petén Itzá.

Los mapas de potencial de agua subterránea para las zonas con cuerpos de agua indican la presencia ya sea del humedal o del lago existente en el departamento. La zonificación del potencial de aguas subterráneas en relación al cuerpo acuático existente se realizó y ponderó de acuerdo al Cuadro 2.10. Al elaborar las listas de productores agrícolas se consideró que las comunidades asentadas en un radio de 1-2 km de la periferia de los cuerpos de agua considerados presentaban potencial de alto a muy alto.

Cuadro 2.10. Ponderación de cuerpos de agua

Cuerpo de agua	Peso
Lago	5
Pantano o humedal	4
Manglares	3
Lagos intermitentes	2
No acuático	1

2.3. Análisis integrado de factores condicionantes para la identificación y delimitación del potencial de aguas subterráneas.

La zonificación del potencial de aguas subterráneas se basa en la integración de distintos factores condicionantes previamente descritos tomando en cuenta la relevancia que cada factor puede tener para la circulación y el almacenamiento de aguas subterráneas.

Los distintos mapas temáticos fueron rasterizados, reclasificados y se les asignaron pesos apropiados de modo que pudieran integrarse para una evaluación multicriterio. Para zonificar el potencial de aguas subterráneas se siguieron los siguientes pasos:

- (i). Selección de datos de entrada en base a los parámetros que controlan la presencia de aguas subterráneas.
- (ii). Las capas del MAGA y las capas generadas durante el presente estudio fueron importadas hacia una base de datos georeferenciada que tuviera la misma referencia espacial.
- (iii). Todos los conjuntos de datos se convirtieron en una malla raster de modo que se pudiera realizar análisis entre los datos de distintos factores tal como el análisis de sobreposición.
- (iv). Todos los conjuntos de datos se reclasificaron en base a su importancia para el potencial de aguas subterráneas.

(v). Antes de realizar la integración de los conjuntos de datos se utilizó el Proceso de Jerarquía Analítica de Saaty (1980) para la evaluación de los pesos de clase individuales y calificar los mapas. En este método se comparan entre sí mismas la importancia relativa de cada clase individual dentro del mismo mapa así como los mapas de distintos factores generando matrices importantes con pesos calculados. Los pesos derivados con este método se normalizaron después de multiplicarlos por 100 y de redondearlos a un valor entero de modo que se evitaran complejidades de cálculo para análisis posteriores.

(vi). Se generaron ocho matrices para comparación de pares de cada conjunto de datos en un solo mapa con el peso calculado para cada conjunto de datos de modo que se clasificaron los mapas de factores en base al peso calculado.

(vii). Después de realizar la comparación de pares para cada mapa temático tomando en consideración la influencia de cada mapa en el potencial de aguas subterráneas, se generó una sola matriz con el peso calculado para cada mapa temático.

Para delimitar las zonas con diferente potencial de agua subterránea se realizó la integración de los conjuntos de datos mediante la Combinación Lineal de Pesos donde el peso de cada clase individual se multiplicó por las calificaciones de los mapas y luego se añadieron los resultados.

Para aplicar la evaluación multi-criterio se asignó un conjunto de pesos relativos a cada mapa de acuerdo a la escala de calificación continua desarrollada por Saaty (1980). Los pesos calculados para cada mapa temático se derivaron de las comparaciones por pares de cada mapa en base a la importancia relativa que cada mapa tiene para la acumulación de aguas subterráneas.

Los diferentes tipos de rocas (litología), los lineamientos estructurales y la geomorfología fueron tomados en consideración como los factores principales que controlan la circulación y almacenamiento de agua subterránea.

Se considera que la litología constituye el factor principal ya que las propiedades físicas de los distintos tipos de rocas son una evidencia indirecta que definen si un área tiene potencial de agua subterránea bajo, medio o alto.

La geomorfología fue considerada como el segundo factor de importancia debido al hecho de que la infiltración del agua en el terreno depende de los tipos de suelos, sedimentos, relieve y vegetación.

Los lineamientos estructurales constituyen normalmente el tercer factor de importancia que controla la circulación y almacenamiento de agua subterránea aunque en terrenos cristalinos puede considerarse un factor de extremada relevancia.

El Cuadro 2.11 muestra los pesos asignados a todos los factores que fueron integrados en los modelos de potencial de agua subterránea.

Cuadro 2.11. Distribución de pesos para los distintos mapas temáticos.

Factor Condicionante	Municipios de Petén		Departamentos			
	Con karst	Sin karst	Con karst	Con Karst/sin pozos	Sin karst	Sin Pozos/Sin Karst
Pendientes	0.1	0.15	0.04	0.04	0.08	0.08
Geología	0.25	0.3	0.16	0.18	0.23	0.23
Lineamientos	0.15	0.25	0.12	0.15	0.19	0.19
Drenaje	0.1	0.15	0.07	0.07	0.07	0.15
Balance: (Precipitación- evapotranspiración)	0.1	0.15	0.09	0.1	0.08	0.08
Karst	0.3		0.17	0.25		
Pozos agua			0.15		0.15	
Cuerpos agua			0.2	0.21	0.2	0.27
Sumatoria	1	1	1	1	1	1

Para facilitar la socialización de los resultados del presente estudio, se ha adoptado una escala semafórica en los distintos mapas generados, que muestra el potencial de aguas subterráneas de cada departamento analizado. Esta escala se muestra en el Cuadro 2.12.

Cuadro 2.12. Escala a colores para identificación de zonas con distinto potencial de agua subterránea.

Ponderación	Potencial
1	Muy Bajo
2	Bajo
3	Moderado
4	Alto
5	Muy Alto

Los mapas que muestran la zonificación espacial del potencial de aguas subterráneas por departamento, y en el caso de Petén por municipio, así como el mapa nacional de potencial de aguas subterráneas se incluyen en un Atlas de Mapas anexo a este documento.

El mapa de potencial de aguas subterráneas generado para cada departamento muestra que el potencial está principalmente relacionado con la litología, la geomorfología y los lineamientos estructurales.

La validación de los modelos por departamento se realizó en los casos en que se contó con información disponible para pozos de agua. Los departamentos para los cuales se contó con información de pozos, principalmente por parte del INFOM (Anexo C), fueron Guatemala y Chimaltenango. Para el resto de departamentos del país se contó con datos puntuales de algunos pozos por lo que la validación de estos modelos es una tarea que podría realizarse en el futuro cercano, a medida que la información de los pozos esté disponible.

2.4. Evaluación Cuantitativa del Potencial de Aguas Subterráneas

La evaluación cuantitativa del potencial de aguas subterráneas requiere contar con datos de pozos de agua, particularmente la columna estratigráfica de cada pozo y las memorias de cálculo de las pruebas de bombeo y pruebas de recuperación, que permitan estimar los parámetros hidráulicos de acuíferos tal como transmisividad, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica.

El banco de datos de pozos de agua que se logró compilar para el proyecto consiste principalmente de 54 pozos de agua construidos por el INFOM en diferentes lugares de Guatemala (Anexo C). Los datos recabados para cada pozo son profundidad, rendimiento, nivel estático y nivel dinámico. No estuvo disponible la columna estratigráfica ni las memorias de cálculo de las pruebas de bombeo y de recuperación de cada pozo. El no contar con las columnas estratigráficas de los pozos impide establecer la naturaleza y número de los acuíferos que pueden haber sido interceptados por cada pozo y comprender a cabalidad el comportamiento hidráulico del pozo. Del mismo modo, al no documentar la estratigrafía del pozo no se conoce el espesor de los acuíferos, el cual es un parámetro crítico en las evaluaciones de potencial de agua subterránea.

El tamaño de la muestra de pozos de agua no permite realizar estimaciones cuantitativas de potencial de aguas subterráneas que puedan ser representativas para los diferentes departamentos del país. El departamento con mayor número de pozos de agua es Chimaltenango (Figura 2.10) con 12 pozos provenientes del banco de datos del INFOM y 5 pozos de otras fuentes. De este modo se ha realizado una evaluación de carácter indicativo para Chimaltenango (Cuadro 2.13). Una evaluación cuantitativa representativa en un sentido estadístico, para cualquier departamento de Guatemala, requeriría un mayor tamaño de la muestra de pozos de agua.

Cuadro 2.13. Evaluación de potencial indicativo cuantitativo de agua subterránea para Chimaltenango

DATOS DE POZOS DE AGUA PARA EL DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO					
No. Pozo	Nombre Pozo	Municipio	Rendimiento		
			(gpm)	m ³ /día	m ³ /año
1	Pacorral	Tecpán	55	302.366	110,363.59
2	La Giralda1	Tecpán	5	25.942	9,468.83
3	La Giralda2	Tecpán	39	211.678	77,262.47
4	Aldea Xenimajuyú	Tecpán	67	363.733	132,762.55
5	El Sitio	Patzún	98	533.337	194,668.01
6	El Llano	Patzún	21	114.0685	41,635.00
7	Panabajal	Tecpán	74	401.883	146,687.30
8	Paxorotot	Tecpán	25	135.378	49,412.97
9	Paxorotot2	Tecpán	51	279.367	101,968.96
10	Pachay Las Lomas	San Martín Jilotepeque	419	2285.948	834,371.02
11	Chuasij	San Juan Comalapa	108	587.4555	214,421.26
12	Xejuyú	San Martín Jilotepeque	433	2361.431	861,922.13
13	Vista Bella	Tecpán	50	272.5	99,462.50
14	Cruz de Santiago	Tecpán	402	2190.9	799,678.50
15	San José Chirijuyú	Tecpán	195	1062.75	387,903.75
16	Chirijuyú1	Tecpán	340	1853	676,345.00
17	Chirijuyú2	Tecpán	91	495.95	181,021.75
		Promedio/pozo	145	792.8051	289,373.86

El rendimiento indicativo por pozo de agua de 145 gpm para la parte central del departamento de Chimaltenango puede servir de referencia para el diseño a nivel de pre-factibilidad de un proyecto de abastecimiento de agua. De este modo, si la demanda de agua de un proyecto determinado es de 450 gpm puede considerarse que el proyecto necesitaría por lo menos la construcción de 3 pozos de agua.

El rendimiento final de cada pozo que se va a construir no se puede establecer hasta después de la conducción de las pruebas de bombeo y pruebas de recuperación en cada pozo. Esto significa que el diseño a nivel de factibilidad y diseño final de la red hidráulica del proyecto no se conocerá hasta que se terminen de evaluar los acuíferos de la zona mediante las pruebas de bombeo y de recuperación. Frecuentemente será necesario realizar un rediseño de la red hidráulica después de que se conozca el rendimiento sostenible de agua de cada pozo.

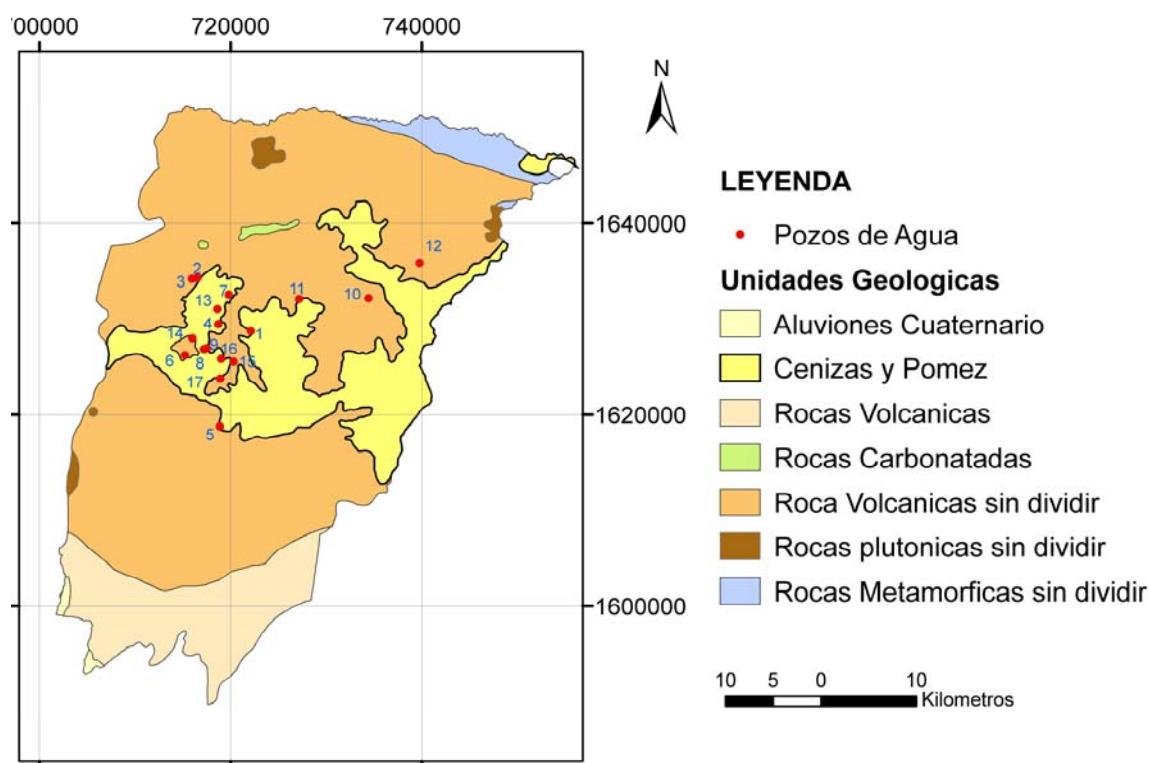


Figura 2.10. Mapa geológico de Chimaltenango con localización de pozos de agua (Laboratorio SIG – MAGA, 2009).

Debe tenerse en consideración que de acuerdo a las características geológicas regionales de Chimaltenango (Figura 2.10) en este departamento se han documentado por lo menos 7 tipos de acuíferos de los cuales no se tiene un buen conocimiento de su comportamiento local ya que el control geológico durante la construcción de pozos de agua en Guatemala tiende a ser inapropiado al no contar por lo menos con una columna estratigráfica del pozo elaborada por geólogo acreditado en el Colegio de Ingenieros de Guatemala.

2.5. Elaboración de listados de comunidades de acuerdo al potencial de aguas subterráneas

Para la construcción de listados de comunidades según su potencial de aguas subterráneas se integró la capa de potencial de aguas subterráneas de cada departamento con la capa de puntos de poblaciones totales proporcionadas por el Laboratorio SIG del MAGA. Este proceso permitió seleccionar los puntos según la categoría de zonificación de potencial de aguas subterráneas.

De este modo se construyeron tablas indicativas de potencial de aguas subterráneas para las comunidades de cada departamento. Las tablas se presentan en formato digital en un CD adjunto a este informe y constan de los campos que se describen a continuación.

OID_SIG	Es el código asignado por el sistema de información geográfica
COD INE	Es el código que corresponde al Instituto Nacional de Estadística (INE)
DEPTO	Departamento al que corresponde la comunidad
MUNICIPIO	Municipio al que corresponde la comunidad
LUGAR_POBL	Corresponde al nombre de la comunidad
CATEGORIA	Corresponde a la categoría que tiene cada poblado (ciudad, pueblo, etc)
POBTOT	Es la cantidad de individuos por comunidad
HOMBRES	Es la cantidad de hombres por comunidad
MUJERES	Es la cantidad de mujeres por comunidad
URBANA	Es la cantidad de la población urbana
RURAL	Es la cantidad de la población rural
COD_MUN	Es el código municipal por comunidad
POTENCIAL H2O	Potencial hídrico por comunidad

CAPITULO III

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL USO Y APLICACIONES DE LOS MAPAS DE POTENCIAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Aunque el objetivo principal de la zonificación hidrogeológica realizada para cada departamento ha sido la elaboración de listados de comunidades conformadas por pequeños y medianos productores agrícolas con potencial para el desarrollo de proyectos de riego, los resultados del presente estudio pueden utilizarse también para otros proyectos de desarrollo incluyendo gestión de riesgos por sequías, apoyo a la seguridad alimentaria, manejo de áreas protegidas, y abastecimiento de agua potable.

Los resultados del presente estudio constituyen una evaluación indicativa y preliminar del potencial de aguas subterráneas que presenta cada departamento. Los mapas pueden servir de apoyo en la planificación y diseño de un plan de desarrollo de aguas subterráneas ya sea a nivel departamental o municipal. Del mismo modo, los mapas se constituyen en instrumentos fundamentales para la selección y priorización de áreas para diseño y posterior implementación de proyectos de riego agrícola, particularmente apoyándose en las listas de comunidades que se incluyen en el CD anexo.

Los mapas departamentales de potencial de agua subterránea constituyen instrumentos orientadores para el desarrollo de aguas subterráneas, aportando lineamientos espaciales acerca del potencial relativo de aguas subterráneas.

La elaboración de los modelos de potencial de aguas subterráneas se ha visto confrontada con los problemas de escala que inevitablemente surgen al abordar proyectos hidrogeológicos. El efecto de la escala se describe en el Anexo A. Para varias regiones del país, como el norte de Petén, la única información geológica disponible fue a escala 1:500,000 la cual se complementó con el mapeo de lineamientos estructurales a escala 1:50,000. Del mismo modo, para gran parte del altiplano volcánico únicamente se contó con información geológica a escala 1:250,000 la cual se complementó con el mapeo de lineamientos estructurales a escala 1: 50,000.

El efecto de la escala también puede apreciarse en la selección de comunidades según su potencial de aguas subterráneas que se incluye en el CD anexo. El caso más ilustrativo es el del departamento de Petén donde una misma comunidad puede presentar diferente categoría de zonificación según la escala de análisis. De este modo puede notarse que a escala departamental varios municipios de Petén muestran patrones de zonificación de potencial diferentes de los obtenidos a escala municipal.

Por lo tanto, el mapa de zonificación departamental de Petén puede utilizarse para una planificación regional de los recursos de agua subterránea mientras que los mapas municipales de zonificación de potencial de aguas subterráneas pueden utilizarse para toma de decisiones a nivel sub-regional o local, en función del tamaño del municipio.

La complejidad geológica del país es manifiesta a las distintas escalas a que se realicen los estudios hidrogeológicos, desde el nivel local al regional. Para algunas regiones como la Planicie Costera del Pacífico no se cuenta con un modelo geométrico sedimentario del aluvión así como tampoco existe información sobre las variaciones estructurales de la cuenca sedimentaria.

Esta complejidad geológica puede explicar las variaciones en el rendimiento de algunos pozos en varios órdenes de magnitud para la Planicie Costera del Pacífico, con un pozo en Retalhuleu reportando 30 gpm, algunos pozos en Masagua con un promedio de 120 gpm, y pozos en La Gomera Escuintla registrando hasta 2,000 gpm.

En algunos sectores del norte de Ciudad de Guatemala se reportan variaciones de 900 gpm a 160 gpm en una distancia de 800 m entre los pozos lo cual obedece a fuertes cambios estructurales y litológicos. Por la complejidad geológica de Guatemala, estos drásticos cambios en rendimiento de pozos de agua documentados para Ciudad de Guatemala y la Planicie Costera del Pacífico pueden ocurrir en cualquier otra región del país.

En varios casos solo se tuvo conocimiento de la geología superficial de las áreas por lo que se desconoce completamente el espesor de los acuíferos. La determinación precisa del potencial de aguas subterráneas de un área particular en cada departamento requiere evaluaciones detalladas de campo a nivel cualitativo y cuantitativo lo cual estuvo fuera del alcance de este estudio. En el Anexo C se presentan los lineamientos principales que forman parte de una exploración formal de aguas subterráneas y que pueden servir de referencia para cualquier proyecto de desarrollo.

Debe tenerse presente que la evaluación de potencial de aguas subterráneas realizada en este estudio es de carácter altamente relativo. Esto significa que la escala de zonificación de potencial de aguas subterráneas de 5 categorías que se ha utilizado debe de emplearse con criterio.

De este modo, si determinado municipio presenta la categoría de potencial "muy bajo" lo que esto significa es que dentro del mismo departamento existe otro municipio que tiene características hidrogeológicas con potencial de aguas subterráneas más alto. La viabilidad en la implementación de un proyecto de riego agrícola está relacionada con varios factores tal como infraestructura, organización comunitaria, acceso a mercados, tenencia de la tierra y voluntad política. Si varios de estos factores coinciden en una zona donde la categoría de potencial de aguas subterráneas salió muy bajo se recomienda llevar a cabo un estudio hidrogeológico específico bajo las pautas que se indican en el Anexo C, lo cual definitivamente permitirá establecer el contexto hidrogeológico definitivo para el proyecto.

La categoría de potencial de aguas subterráneas de bajo (naranja) a muy bajo (rojo) no condena a dicho municipio, o cierto sector dentro del municipio, para la implementación de proyectos de desarrollo, ni implica que esta área carezca en lo absoluto de fuentes de agua subterránea. Lo que la categoría de potencial de bajo a muy bajo posiblemente signifique es que el nivel de aguas subterráneas pueda encontrarse muy profundo y/o que el rendimiento del pozo que se construya posiblemente sea bajo (< 100 gpm).

Las zonas geográficas con categorías de zonificación de potencial de aguas subterráneas que varía de moderado (amarillo), a alto (verde) y muy alto (azul) son indicativas de que el potencial puede ser bastante aceptable para la implementación de proyectos de desarrollo.

Es importante que durante la fase de exploración de cualquier proyecto de desarrollo se tomen muestras de calidad de agua pues se han identificado puntualmente acuíferos con dureza en terrenos carbonatados, incursiones salinas en acuíferos costeros, salinización en terrenos compuestos por yeso y/o anhidrita, contaminación natural de sodio y anomalías geotérmicas en zonas volcánicas (anexo E)

El banco de datos de pozos de agua que se logró estructurar consta de datos para 54 pozos de agua proporcionados por el INFOM (Anexo C). El departamento que cuenta con mayor información de pozos de agua es Chimaltenango con 12 pozos, seguido de Totonicapán, Sololá y San Marcos con datos de 5 pozos de agua. Para departamentos como Alta Verapaz, Santa Rosa, y El Progreso no se contó con datos de pozos de agua para la elaboración de los modelos de potencial de agua subterránea.

De este modo, el único modelo de potencial de aguas subterráneas que cuenta con cierta validación con datos de pozos de agua es el modelo de la parte central de Chimaltenango. Los modelos de potencial de aguas subterráneas de los otros departamentos están sujetos a validación con datos de pozos.

Algunas de las preguntas que permanecen sin respuesta y que ameritan un enfoque cuantitativo basado en un extensivo banco de datos de pozos de agua, balance hídrico por lo menos mensual, y mapeos hidrogeológicos a escala mínima 1:50,000 son las siguientes:

¿Cuál es el potencial cuantitativo de aguas subterráneas para cada departamento?

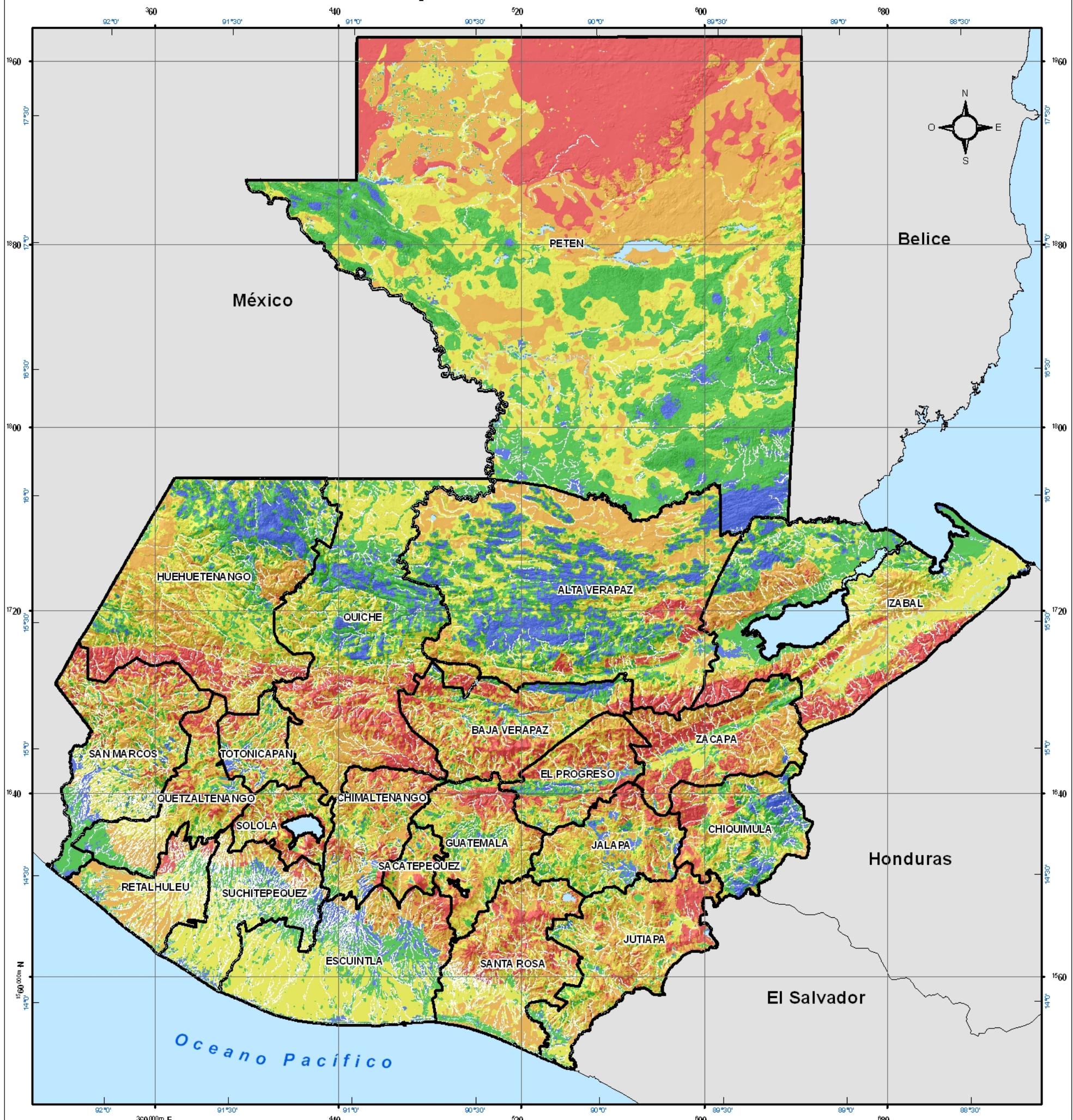
¿De este potencial, cuánto se está utilizando?

El manejo integrado de recursos hídricos en el país carece del marco institucional apropiado para la integración de distintas actividades que conduzcan a un entendimiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico y que permitan la planificación para el uso racional del agua.

El diseño y construcción de pozos de agua pueden enfrentar sorpresas desagradables al no contar con una supervisión geológica adecuada de la obra. Con objeto de apoyar un diseño adecuado y una construcción óptima de los pozos de agua se adjuntan en el Anexo D los términos de referencia indicativos para construcción de pozos de agua. El Anexo D sirve de referencia indicativa ya que deben de elaborarse términos de referencia específicos según las características geológicas de la zona y la demanda de agua del proyecto específico de desarrollo.

Se recomienda la divulgación de los resultados del presente estudio entre los actores protagónicos del país para que de este modo los distintos proyectos de desarrollo tomen en consideración la información hidrogeológica básica generada que contribuya a una mejor toma de decisiones. A futuro también es recomendable incorporar los resultados de próximas validaciones que fortalecerán la información generada.

Potencial de Aguas Subterráneas a escala de reconocimiento (1:250,000) República de Guatemala



Límite departamental

Ríos perennes

POTENCIAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

CATEGORIA	SUPERFICIE	
	Km ²	%
MUY BAJO	18,740	17.21
BAJO	28,923	26.56
MODERADO	32,107	29.49
ALTO	22,334	20.51
MUY ALTO	5,998	5.51
CUERPOS DE AGUA	786	0.72
TOTALES	108,889	100.00

DEPARTAMENTO	POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA (Km ²)					TOTAL DEPARTAMENTO
	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO	
Alta Verapaz	555	2,695	3,171	2,614	1,559	10,594
Baja Verapaz	923	864	660	392	178	3,017
Chimaltenango	520	704	391	170	78	1,863
Chiquimula	369	521	654	599	261	2,403
El Progreso	611	542	329	247	106	1,835
Escuintla	267	454	2,288	1,079	416	4,504
Guatemala	448	725	664	333	20	2,189
Huehuetenango	862	1,996	2,417	1,484	603	7,362
Izabal	1,179	1,490	2,655	1,876	293	7,493
Jalapa	358	673	588	232	178	2,030
Jutiapa	718	1,274	907	378	40	3,317
Peten	6,965	9,382	9,798	8,638	1,145	35,927
Quetzaltenango	333	853	534	383	29	2,133
Quiché	1,161	1,507	2,507	1,640	463	7,278
Retalhuleu	170	740	531	222	38	1,701
Sacatepéquez	90	226	151	54	15	536
San Marcos	663	1,049	955	657	230	3,553
Santa Rosa	842	1,299	773	230	16	3,159
Sololá	330	311	294	103	1	1,040
Suchitepéquez	159	277	1,113	618	226	2,393
Totonicapan	264	324	277	142	69	1,076
Zacapa	954	1,018	448	244	36	2,700
Cuerpo de agua	-	-	-	-	-	786
Total General	18,740	28,923	32,107	22,334	5,998	108,889

Escala de impresión 1: 1,800,000

Kilómetros

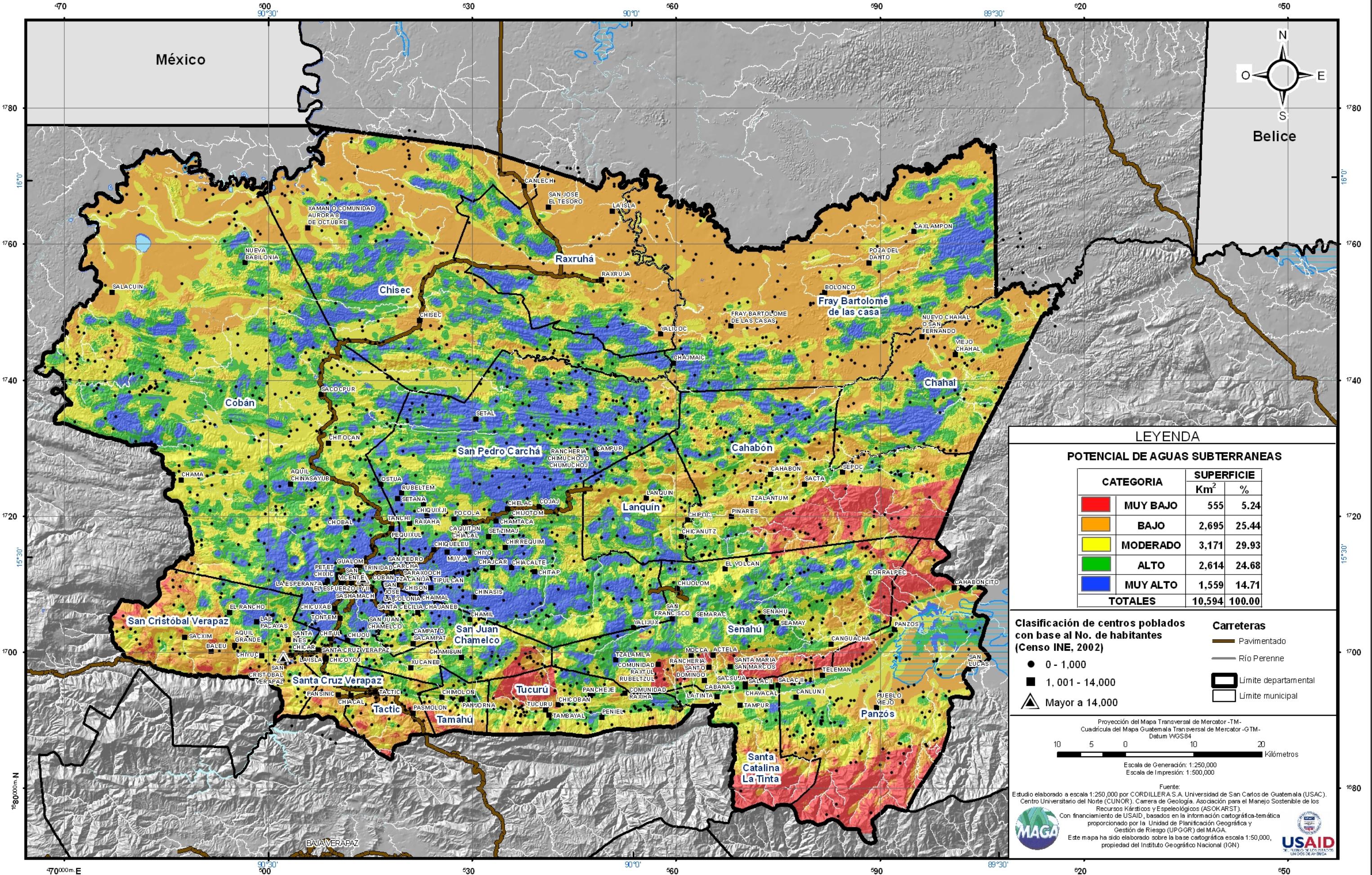
Escala de generación de la información 1:250,000
Proyección del Mapa Transversal de Mercator -TM-
Cuadrícula del Mapa Guatemala Transversal de Mercator -GTM-

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA)
Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo (UPGGR)

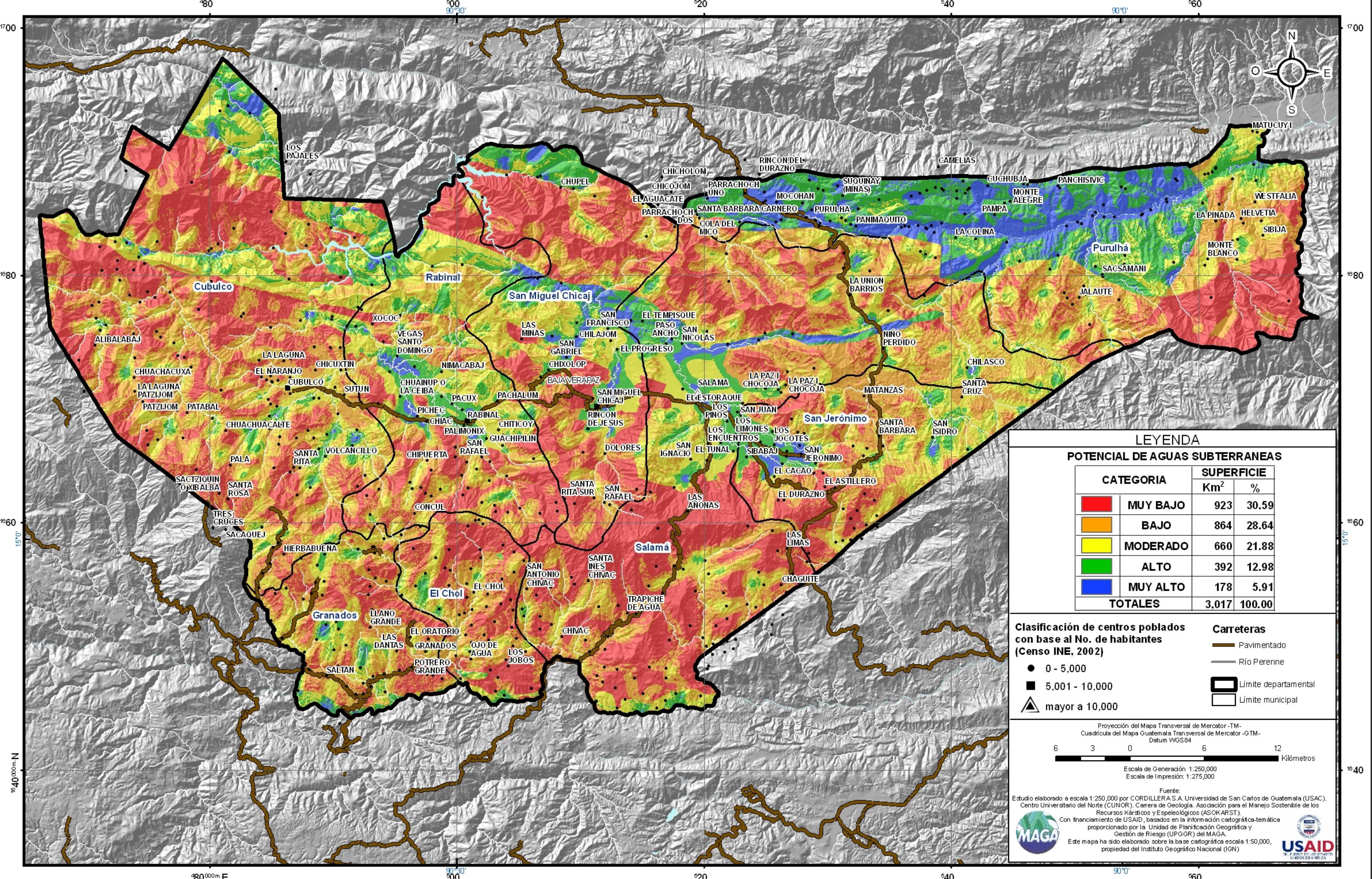


Fuente:
Estudio elaborado a escala 1:250,000 por CORDILLERA S.A. Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).
Centro Universitario del Norte (CUNOR), Carrera de Geología, Asociación para el Manejo Sostenible de los Recursos Kársticos y Espeleológicos (ASOKARST). Con financiamiento de USAID, basados en la información cartográfica temática proporcionado por la Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo (UPGGR) del MAGA.
Este mapa ha sido elaborado sobre la base cartográfica escala 1:50,000, propiedad del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

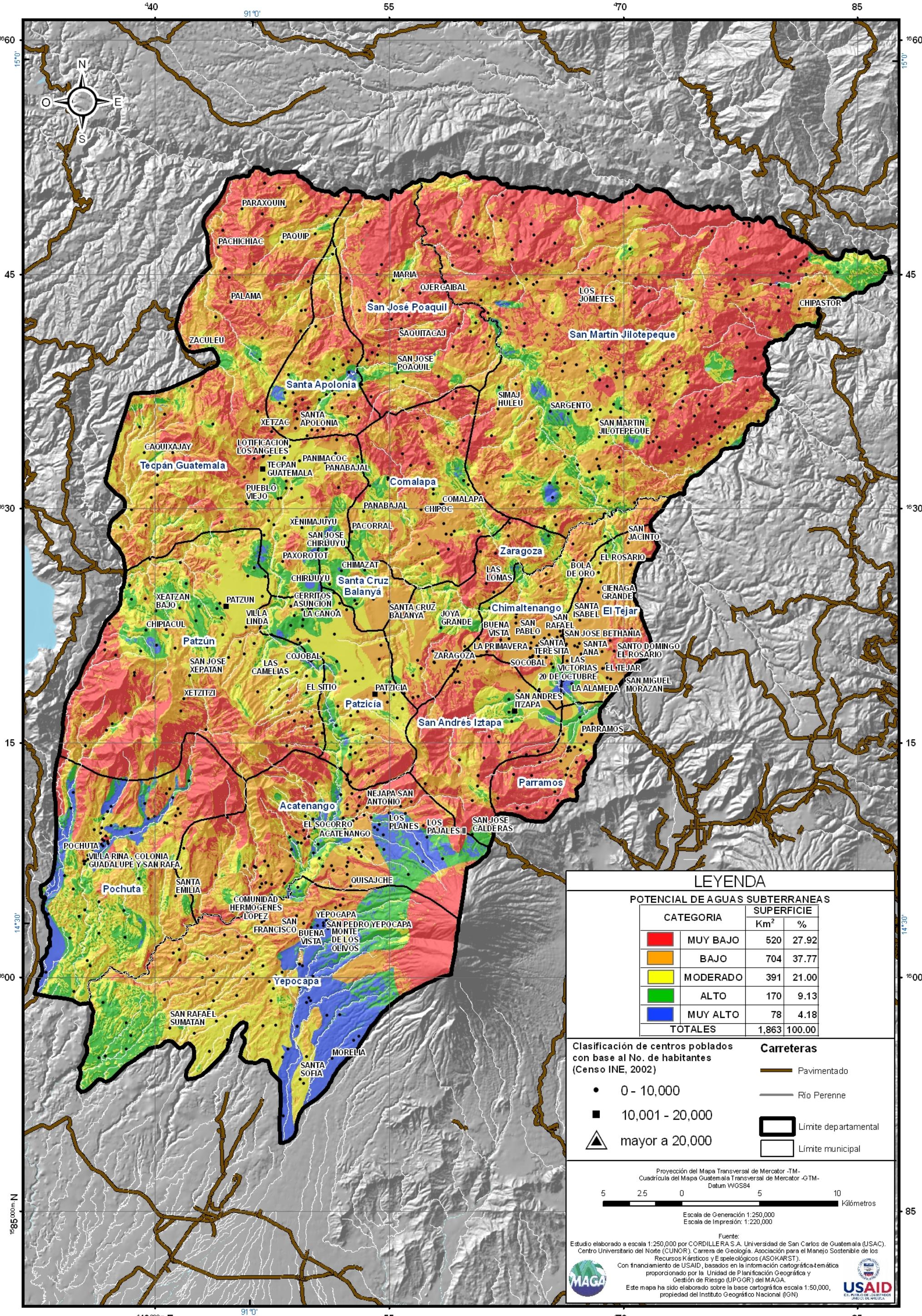
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Alta Verapaz



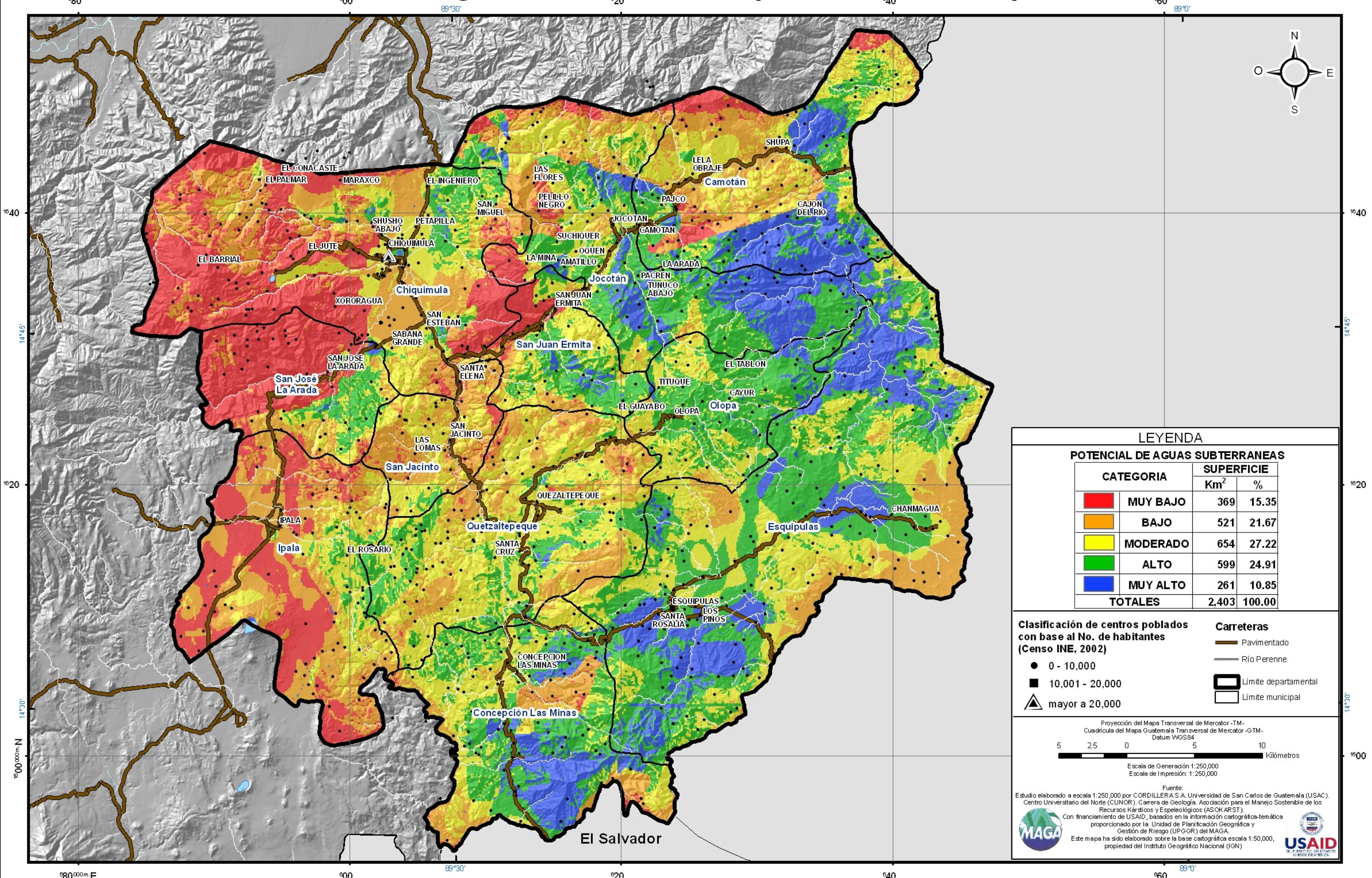
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Baja Verapaz



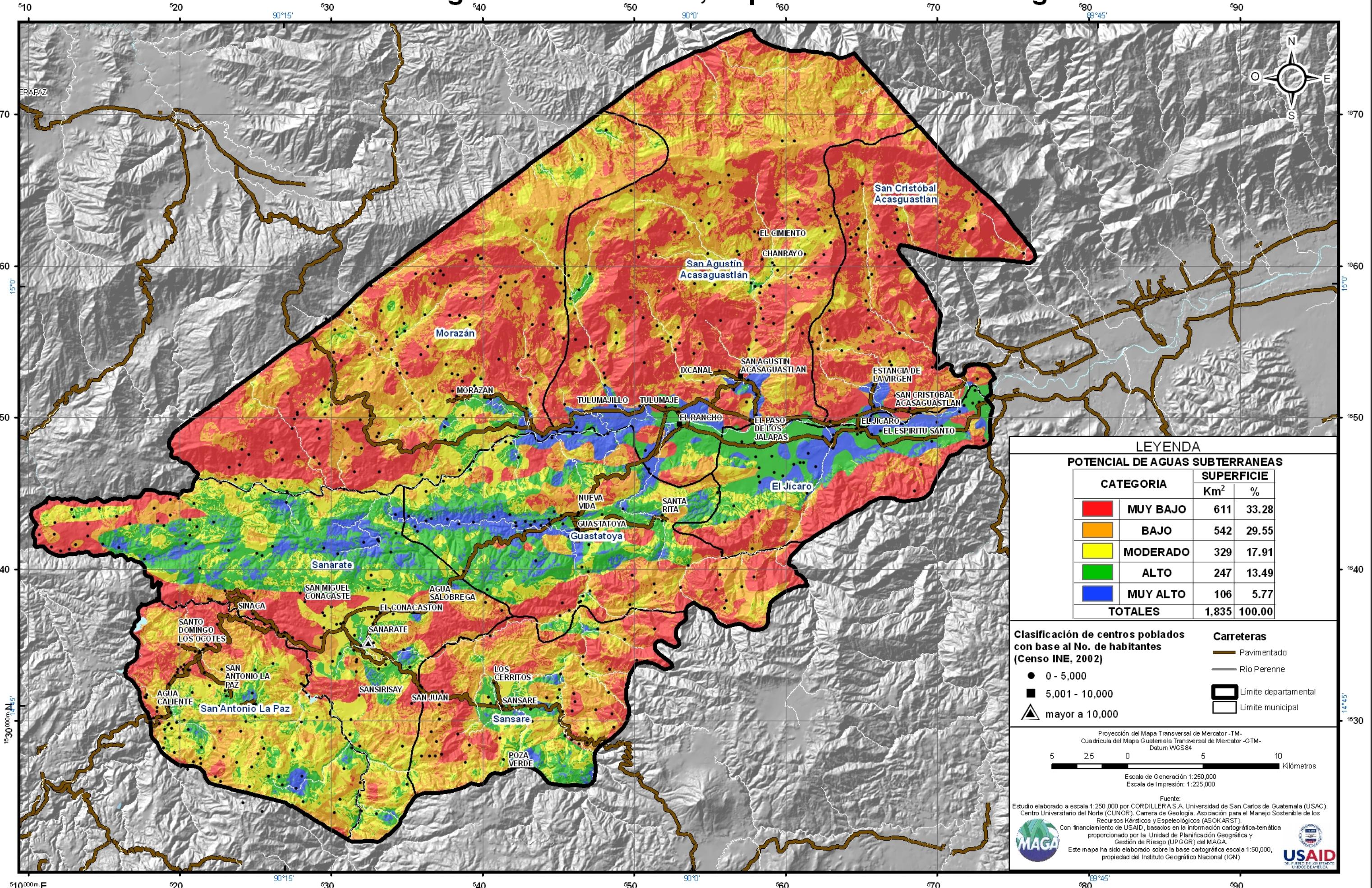
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Chimaltenango



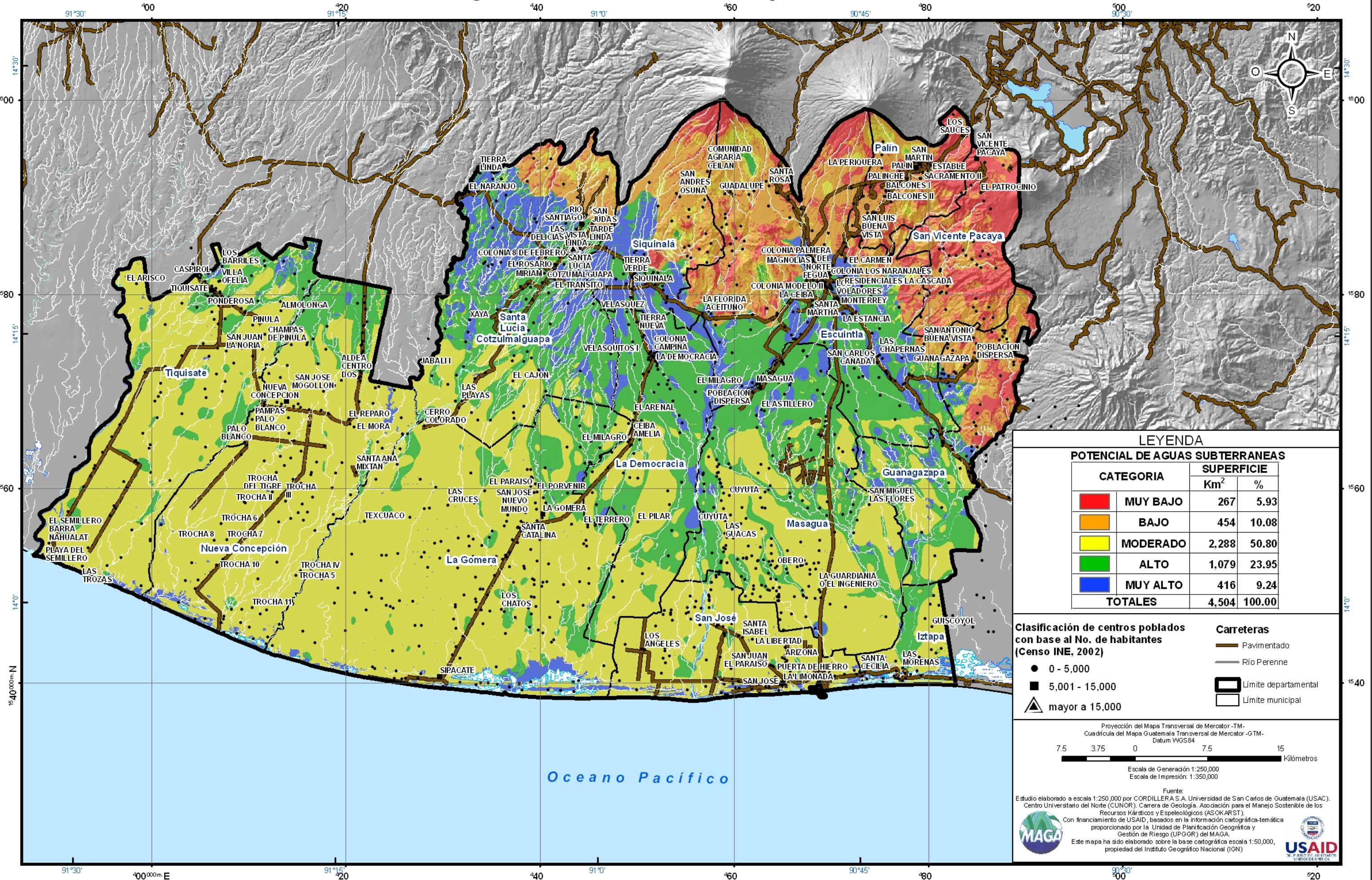
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Chiquimula



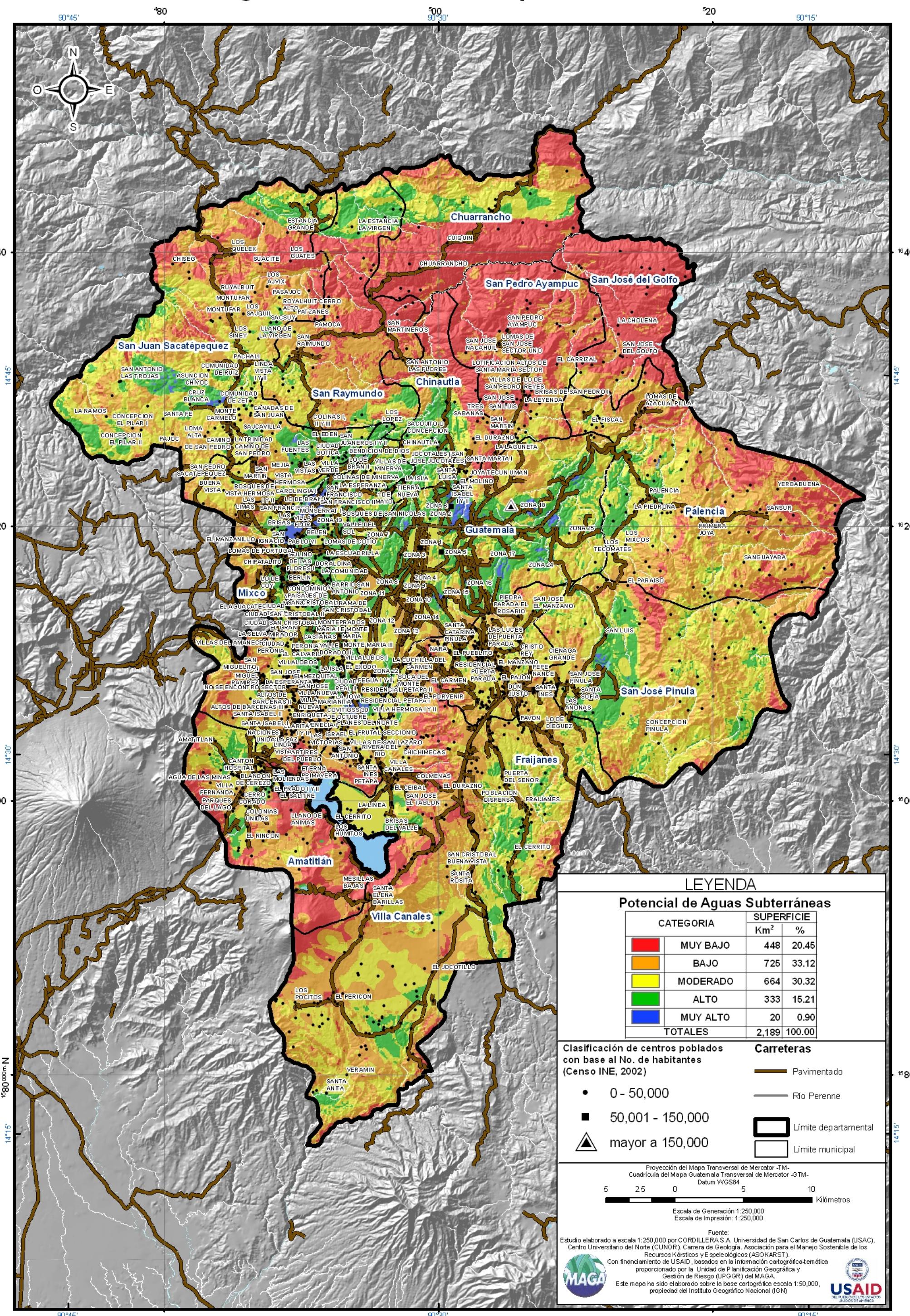
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de El Progreso



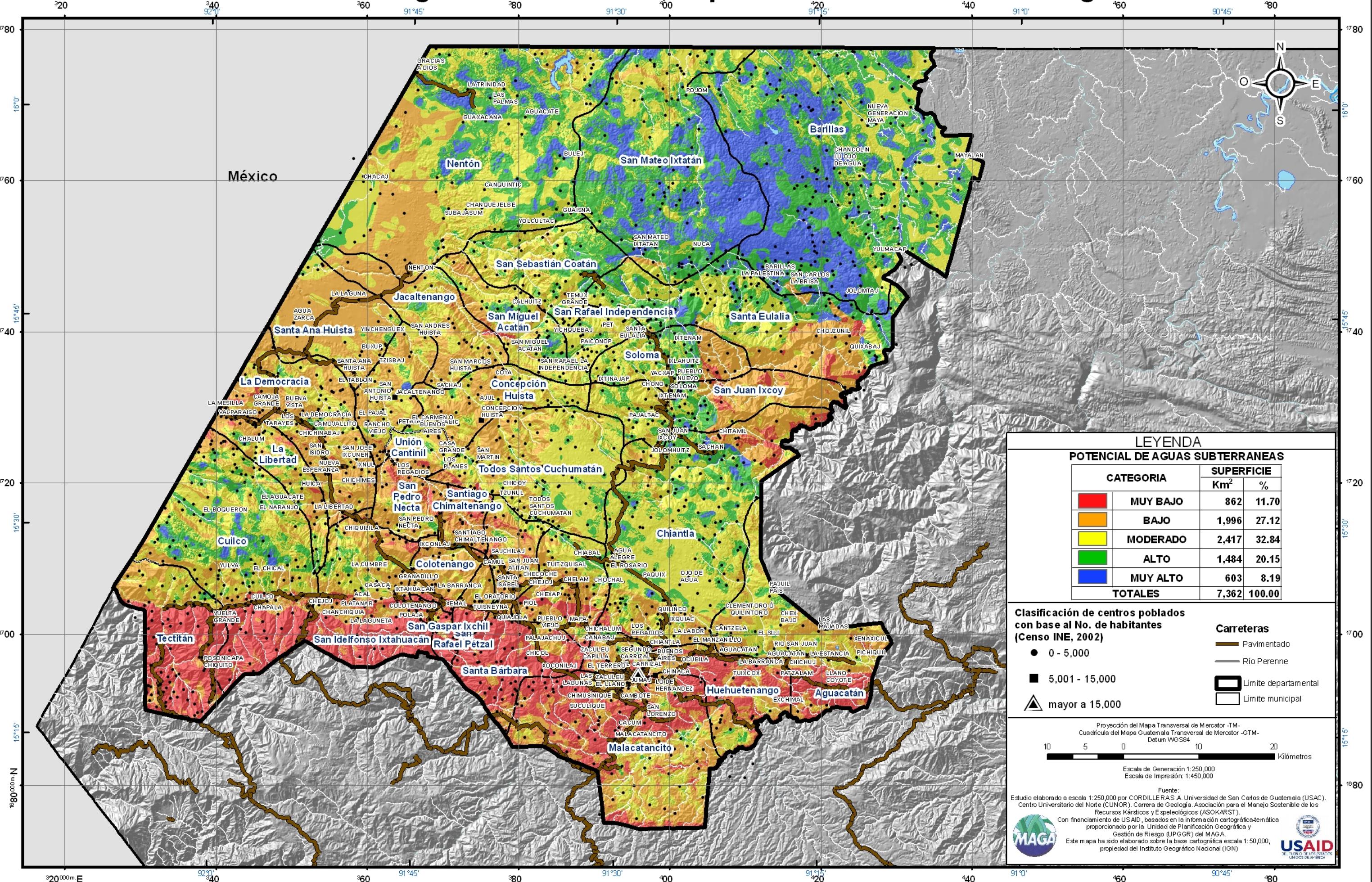
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Escuintla



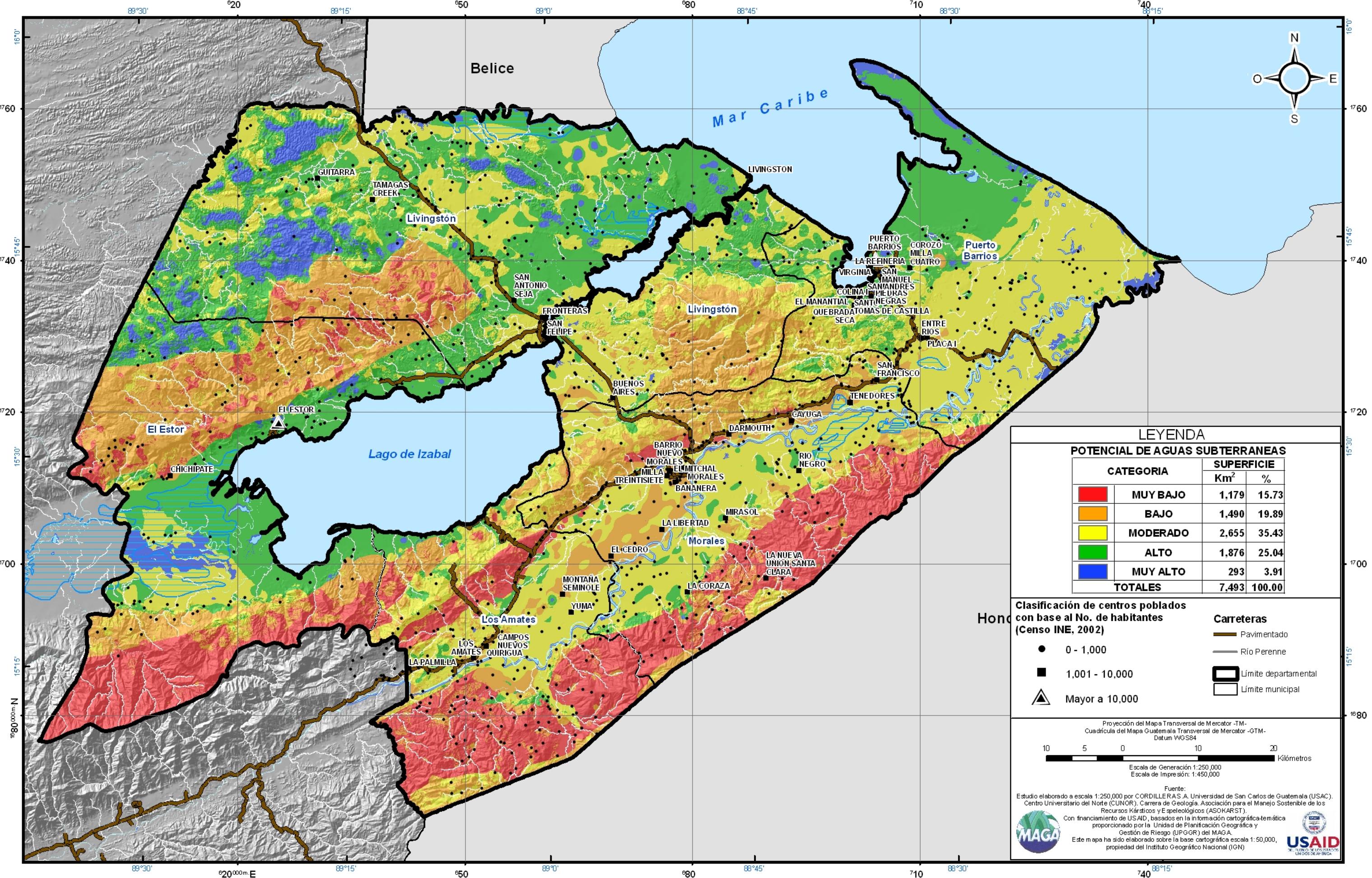
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Guatemala



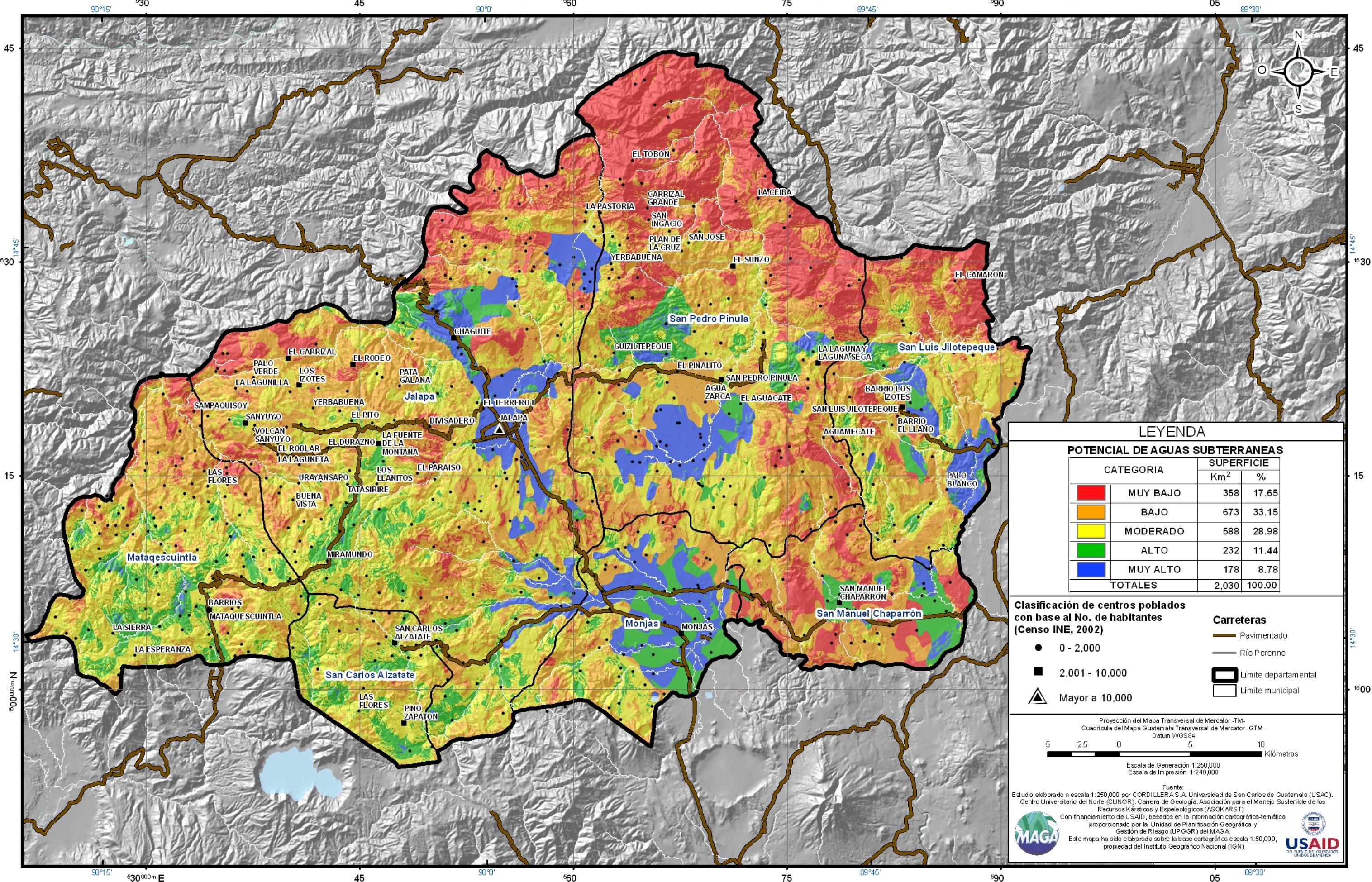
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Huehuetenango



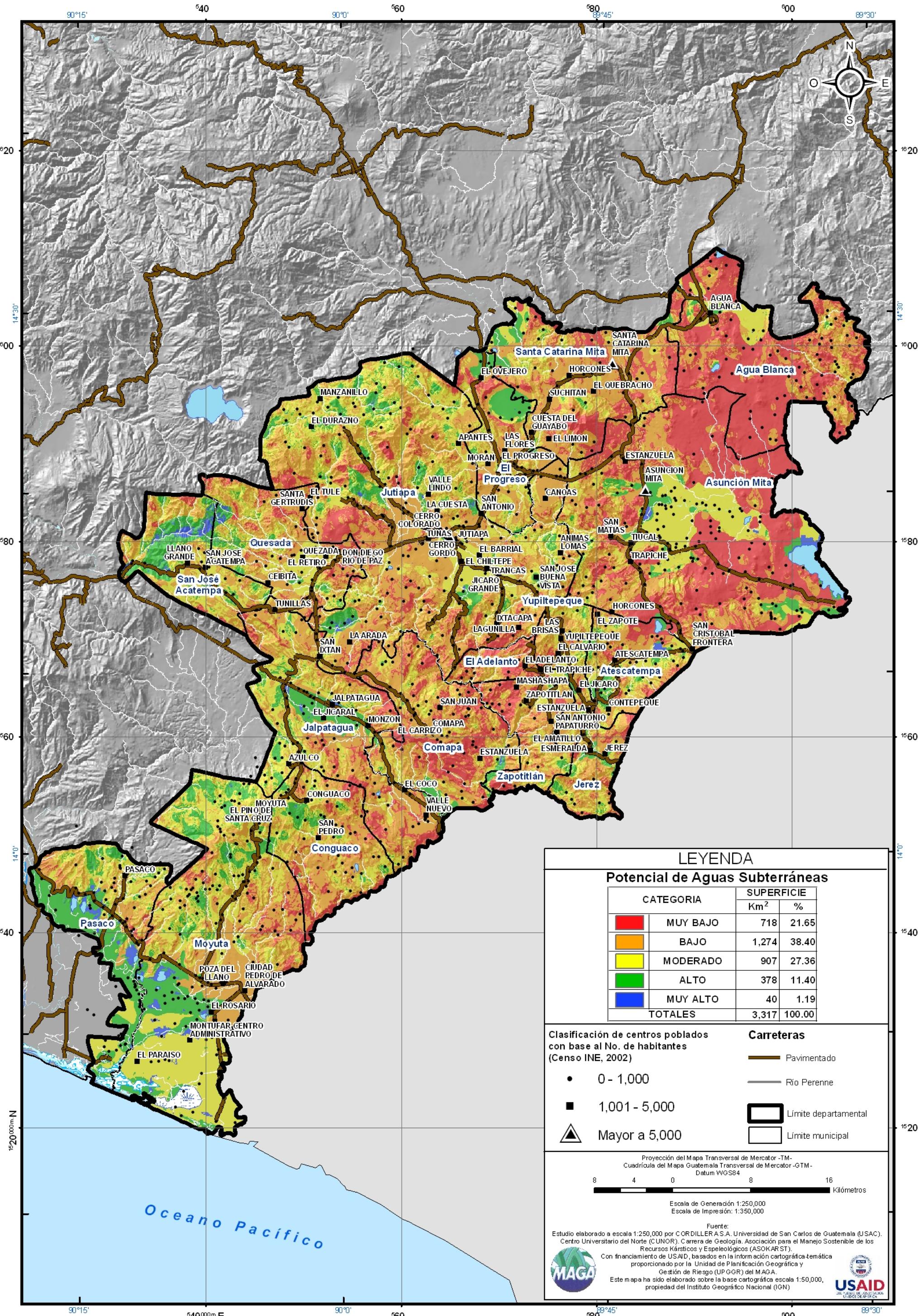
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Izabal



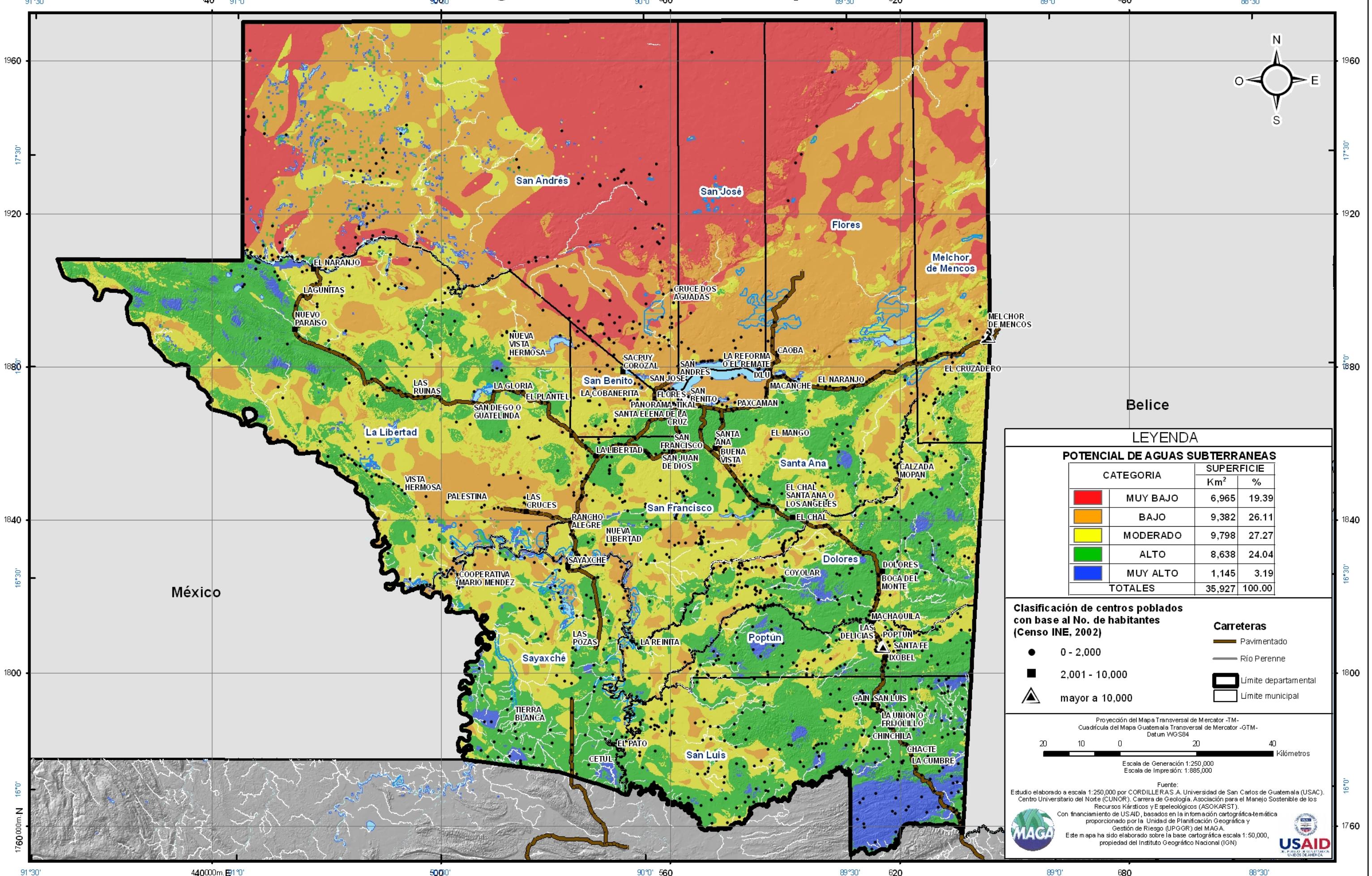
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Jalapa



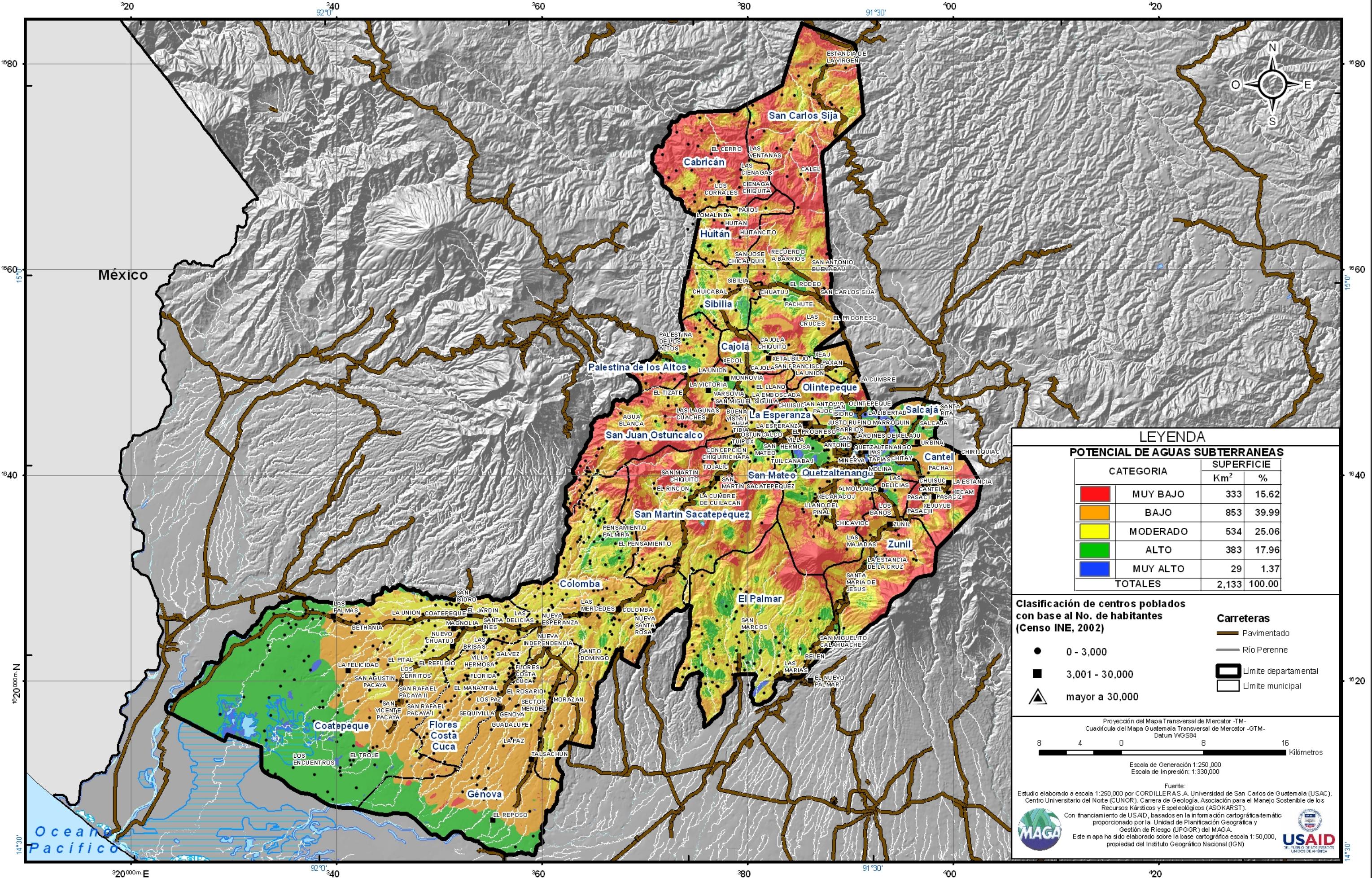
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Jutiapa



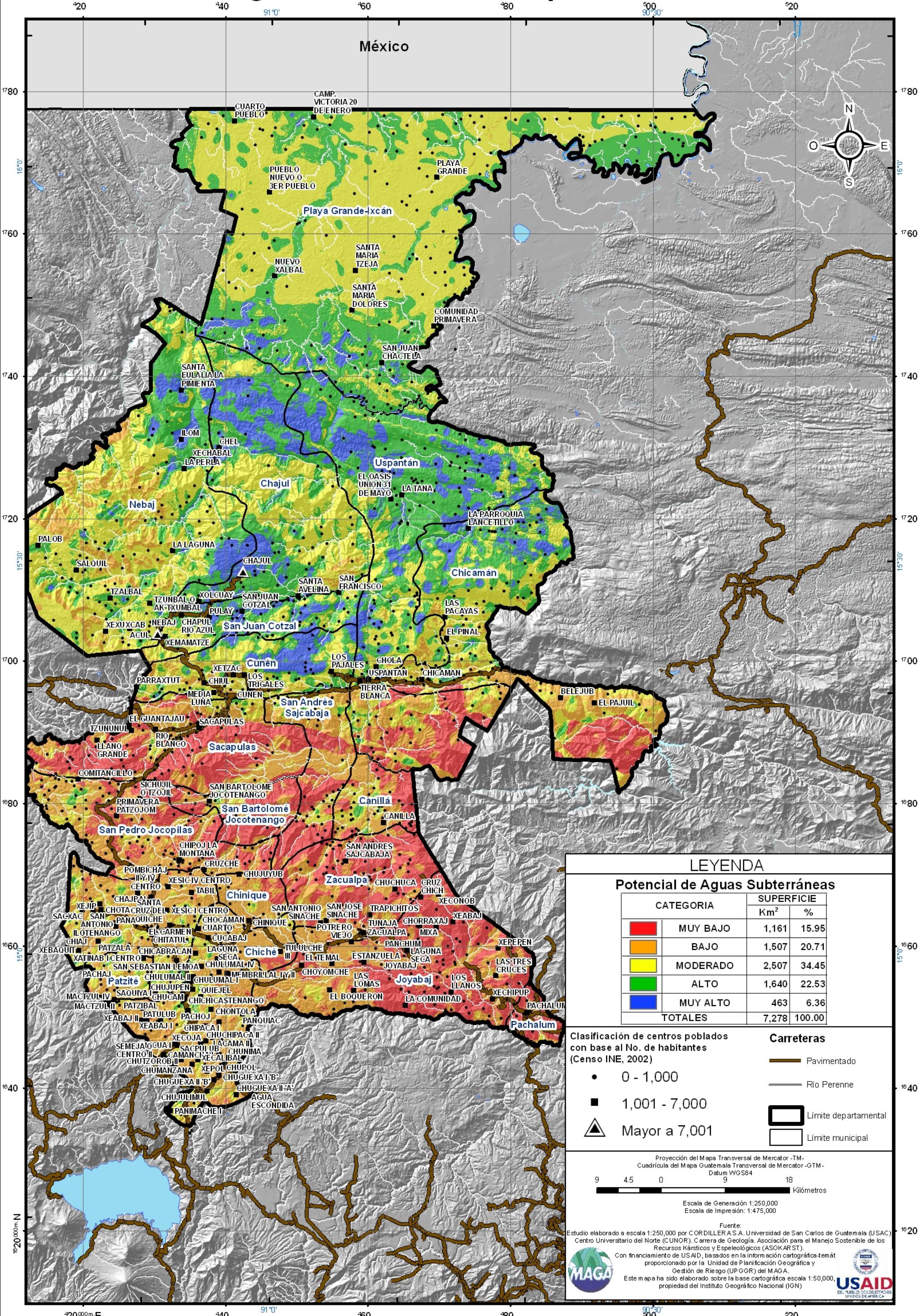
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Petén



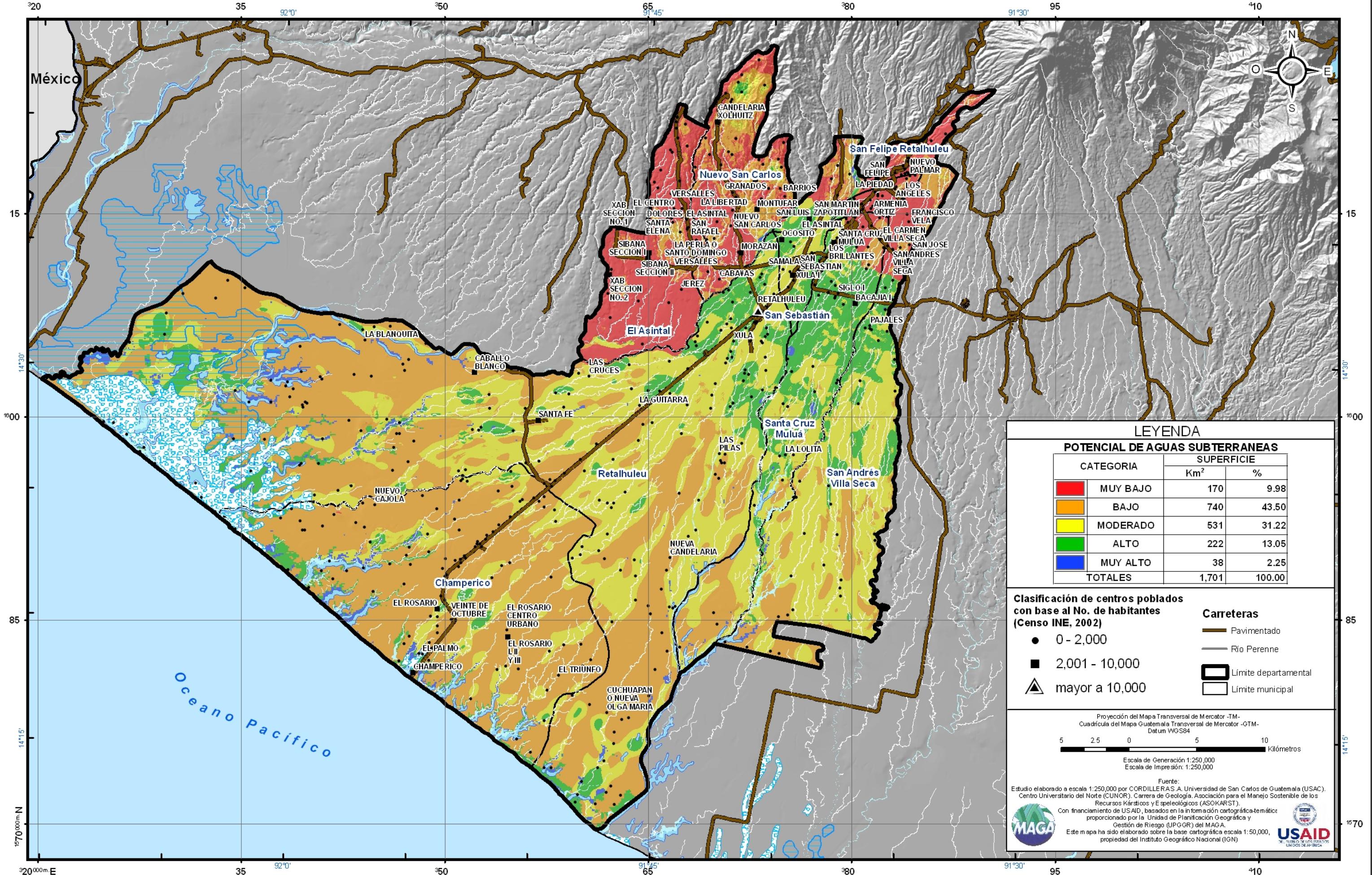
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Quetzaltenango



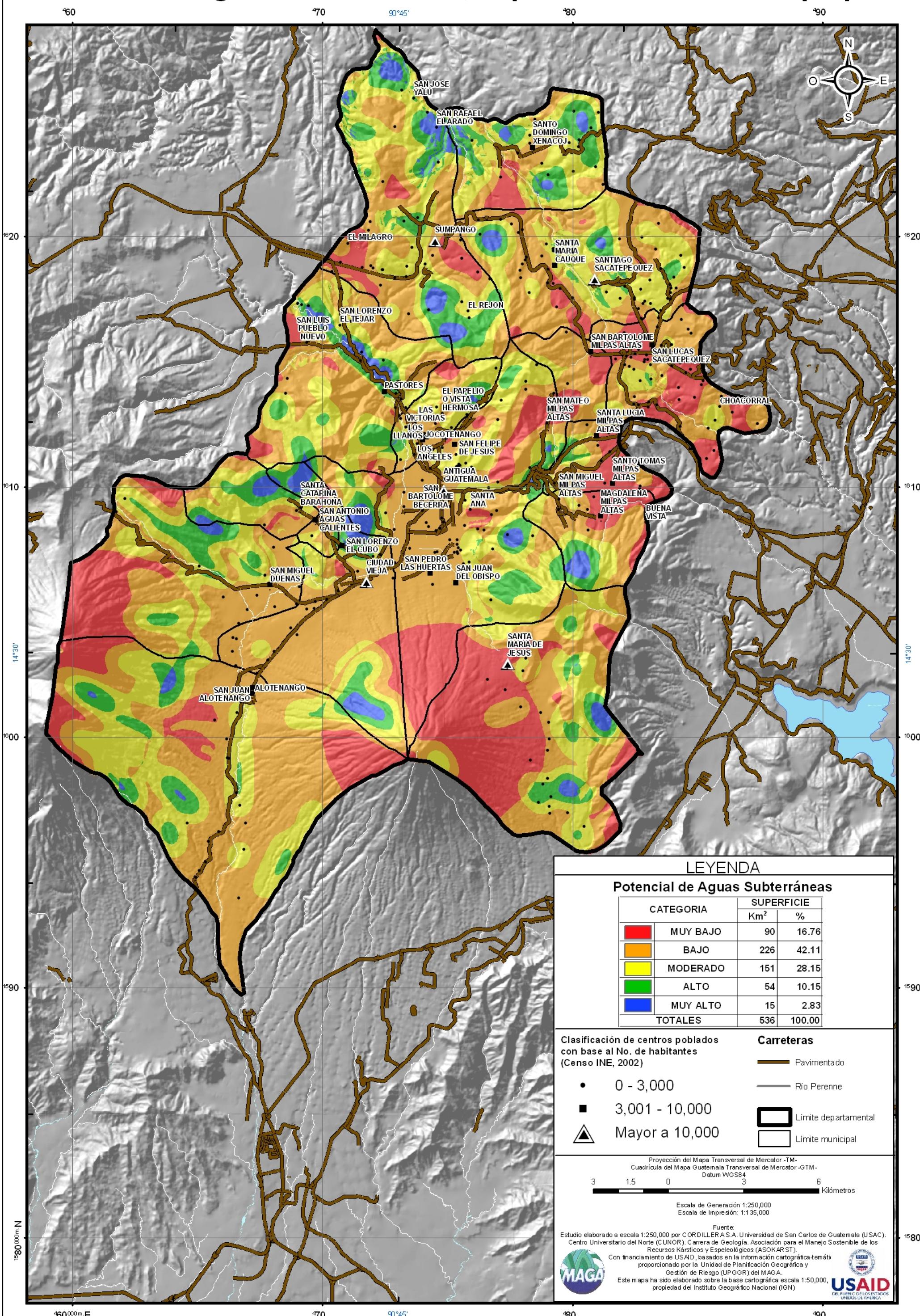
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Quiché



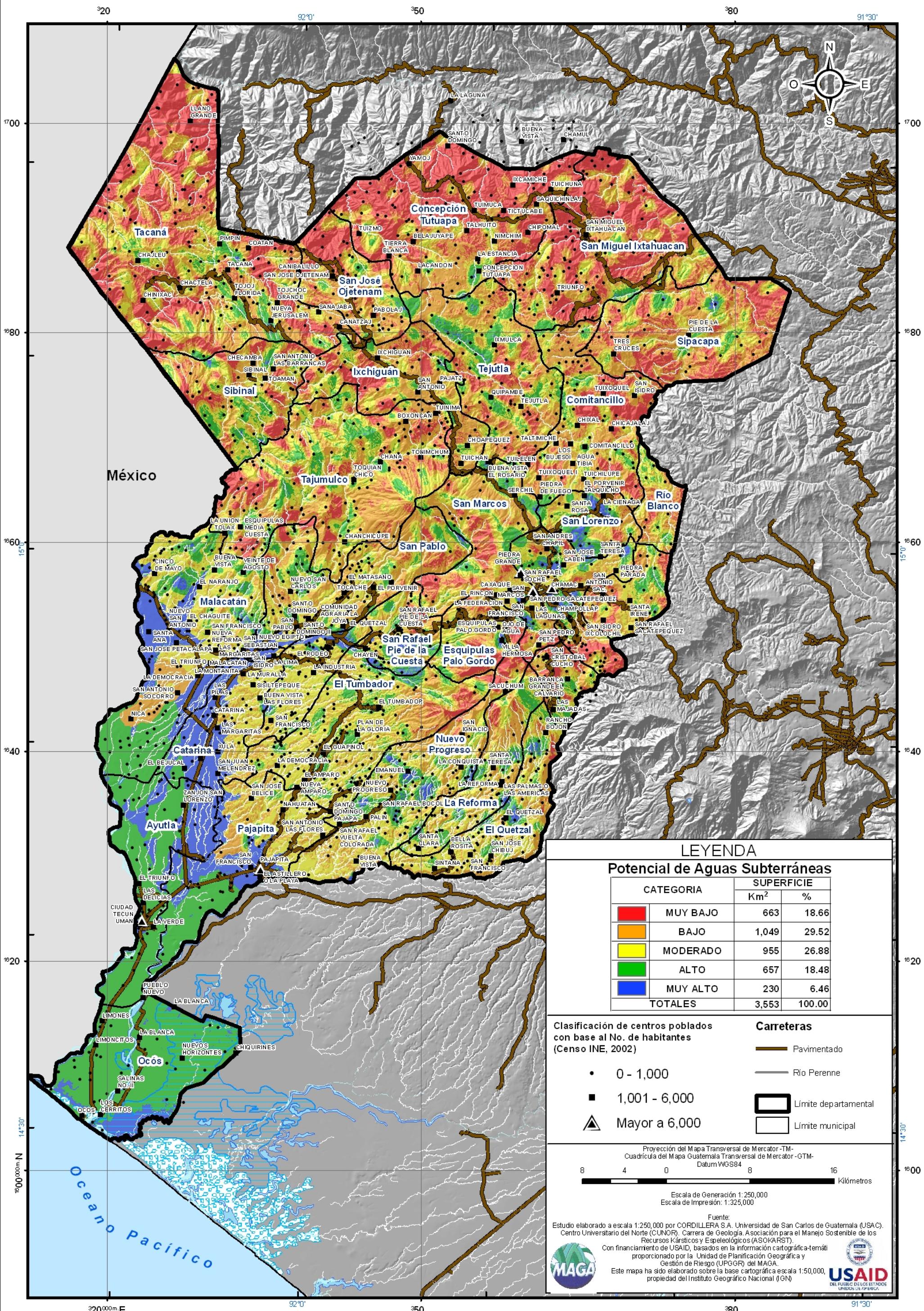
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Retalhuleu



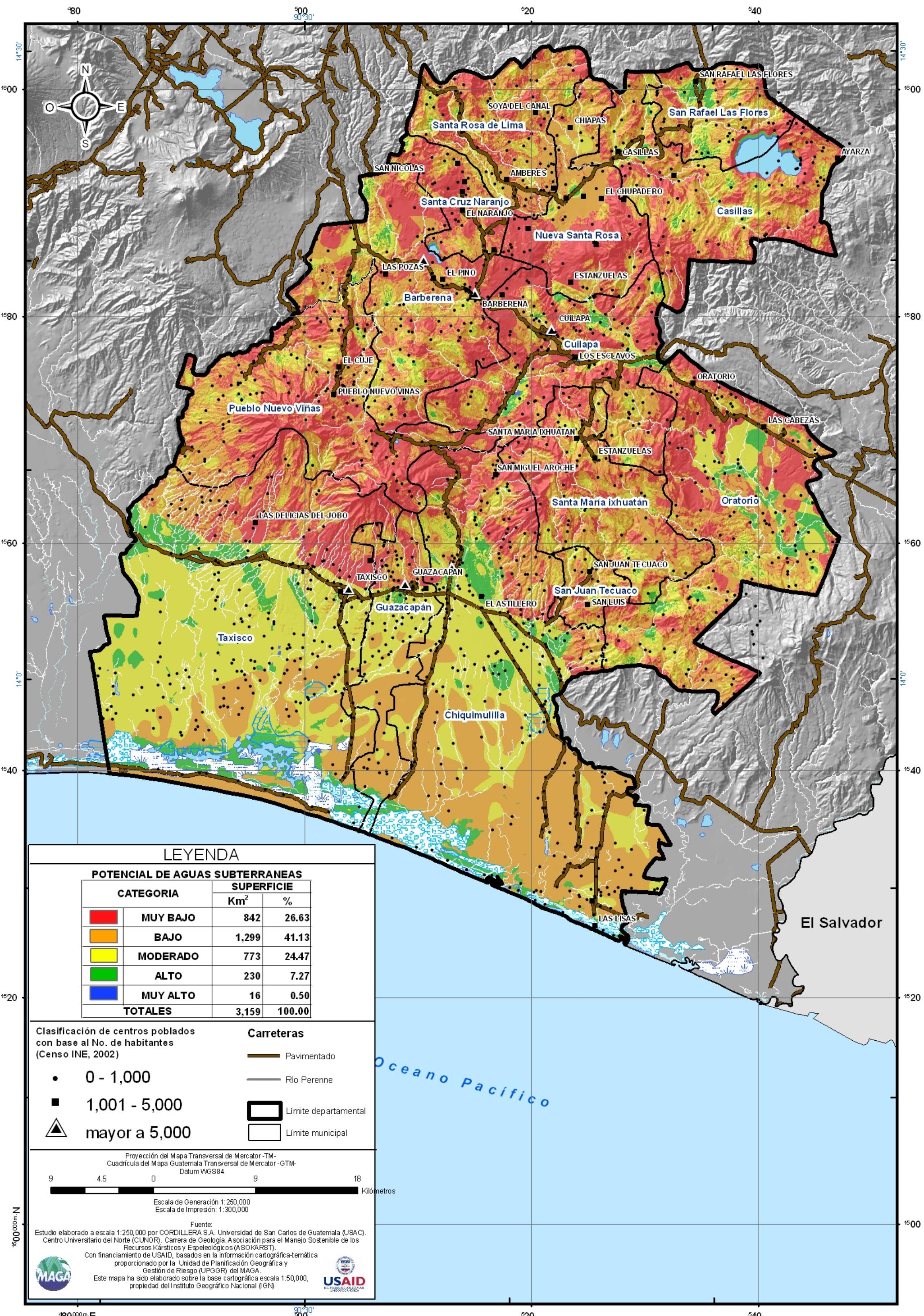
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Sacatepéquez



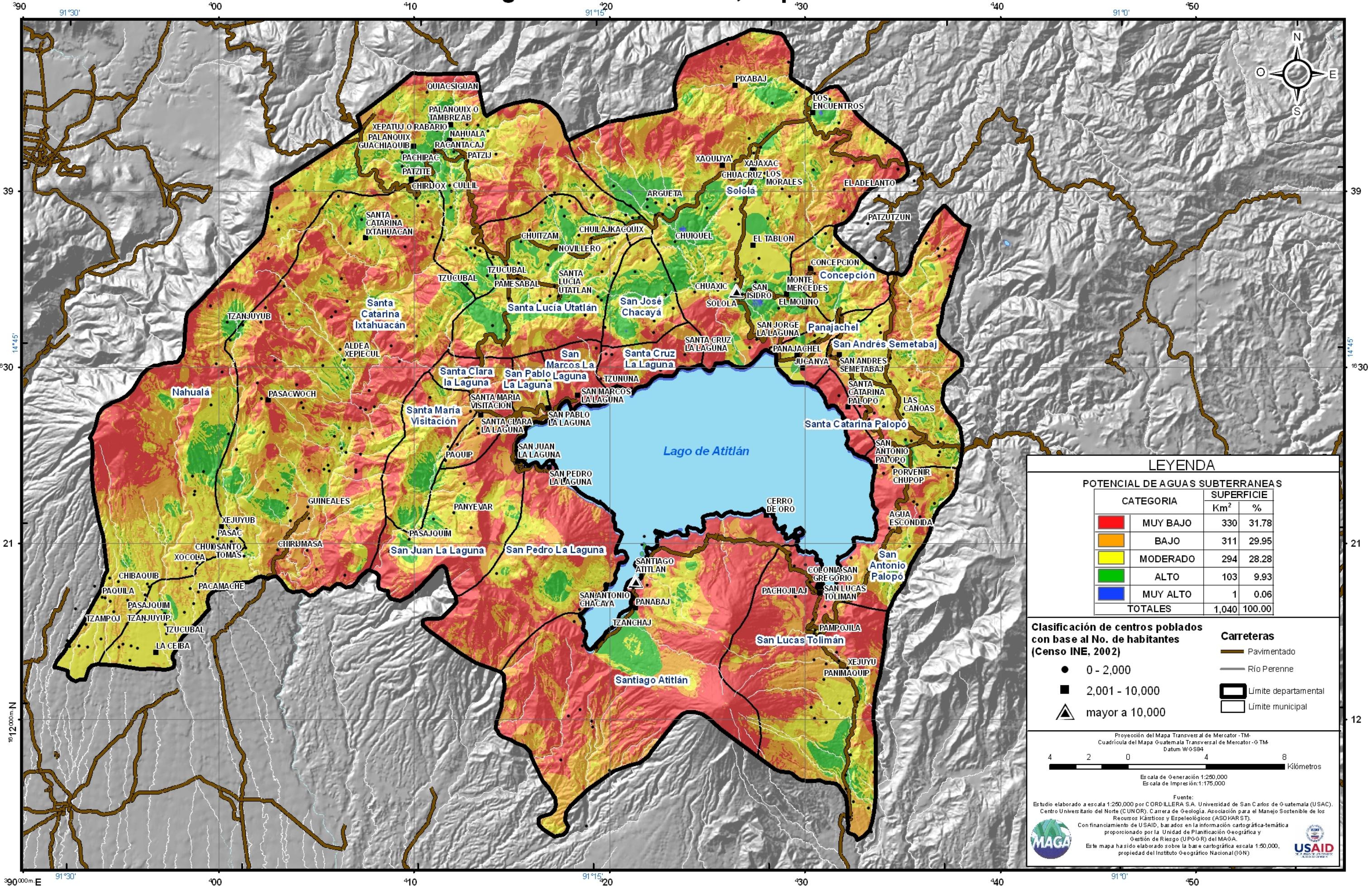
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de San Marcos



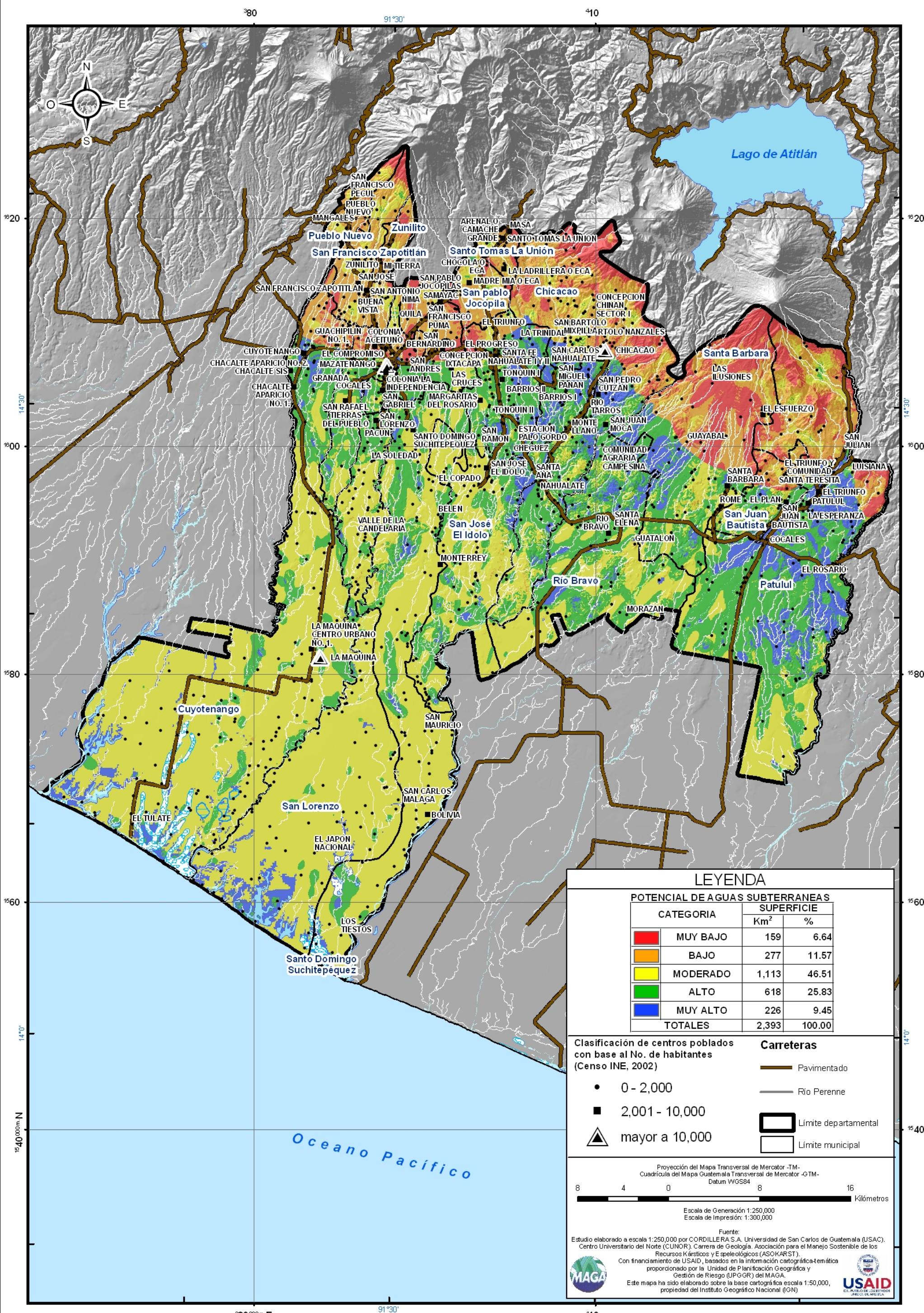
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Santa Rosa



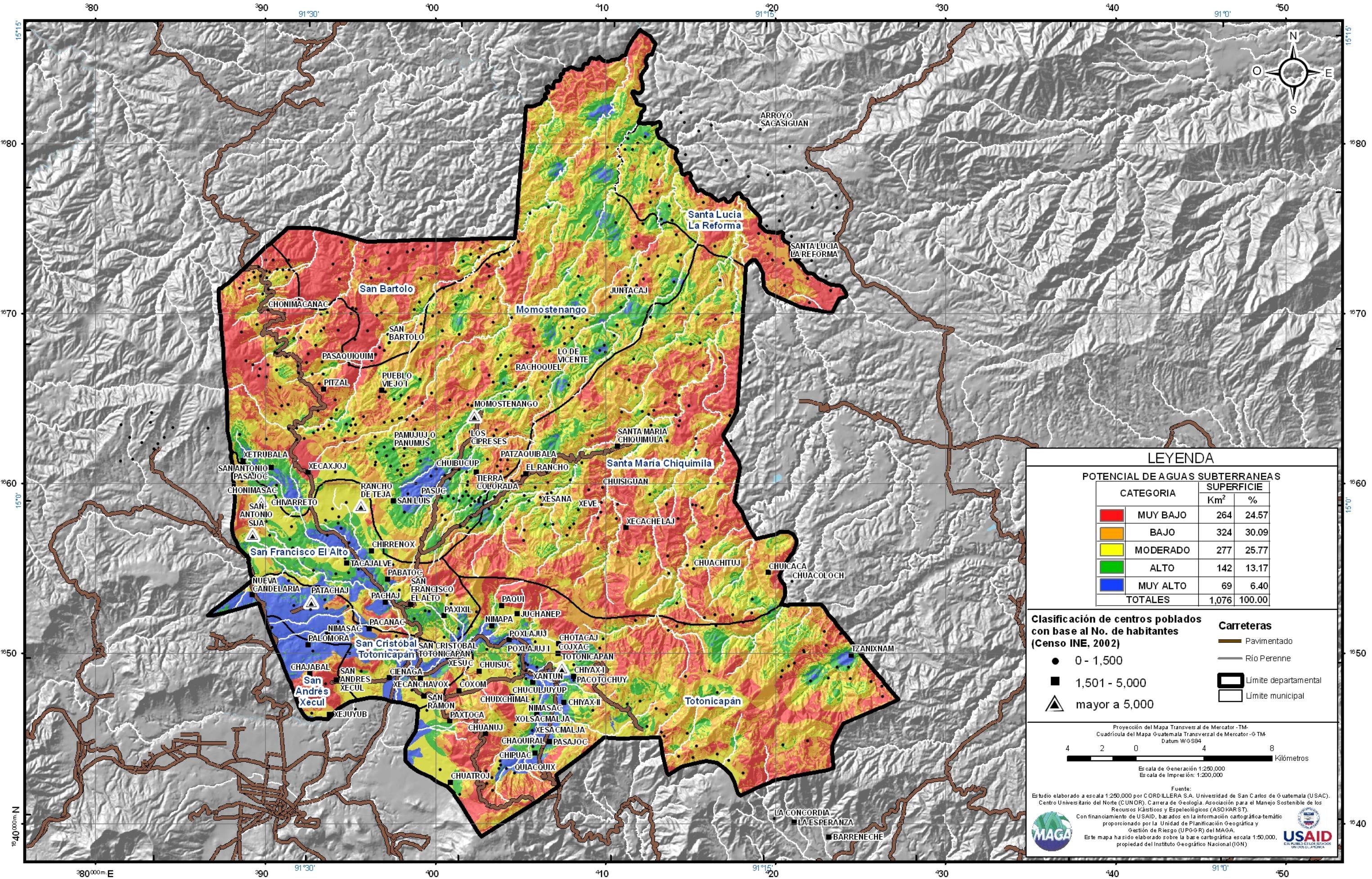
Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Sololá



Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Suchitepéquez



Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Totonicapán



Potencial de Aguas Subterráneas, departamento de Zacapa

