

ACUÍFERO RAIGÓN – PARTE 2: CARTA DE VULNERABILIDAD

Bessouat, Claudia¹ ; Castagnino, Griselda² ; De Los Santos, Jorge³ & Robano, Mariana⁴

Resumen - La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea. El Mapa de Vulnerabilidad del acuífero de Raigón se construyó utilizando la metodología DRASTIC (EPA), un sistema paramétrico que incluye siete características del acuífero.

Para la realización del estudio se confeccionaron mapas temáticos (topografía, freaticografía, suelos, geología), se definió la geometría del sistema y se ajustó un modelo numérico de flujo subterráneo.

El Índice General de Vulnerabilidad se obtuvo así para cada punto del área. Su entorno numérico fue de 51 a 194 (entre 23 a 226 de valores extremos posibles), dividido en tres rangos. El 13% pertenece a áreas de bajo índice de vulnerabilidad, el 68% de índice medio y el 19% de alto índice.

La Carta de Vulnerabilidad General del Sistema Acuífero de Raigón constituye una base de gestión para uno de los principales recursos hídricos del Uruguay y una importante herramienta para el Ordenamiento Territorial y la protección del Medio Ambiente.

Palabras clave: vulnerabilidad, contaminación, protección

¹ Ing. Civil H y A; (IMFIA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. tel: (+5982) 711 33 86 interno 115, fax: (+5982) 711 52 77 e-mail: raigon@fing.edu.uy

² Ing. Civil Hy A , (IMFIA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. tel: (+5982) 711 33 86 interno 115, fax: (+5982) 711 52 77 e-mail: raigon@fing.edu.uy

³ Ing. R.H., MsSc. (IMFIA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. tel: (+5982) 711 33 86 interno 115, fax: (+5982) 711 52 77 e-mail: raigon@fing.edu.uy

⁴ Bach. en Ing. Civil (IMFIA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. tel: (+5982) 711 33 86 interno 115, fax: (+5982) 711 52 77 e-mail: raigon@fing.edu.uy

INTRODUCCIÓN

El acuífero Raigón es un sistema que se desarrolla en medio sedimentario, situado en el Sur de la República Oriental del Uruguay, inmediatamente al oeste de Montevideo. Abastece explotaciones industriales, agrícolas y ganaderas que a la vez vierten efluentes - con y sin tratamiento- sobre la capa freática, por lo que se ve sujeto, como todo acuífero, al posible deterioro de la calidad de sus aguas como consecuencia de actividades potencialmente contaminantes.

El propósito perseguido al estudiar la vulnerabilidad de este sistema es permitir la planificación a efectos de atender solicitudes para la radicación de nuevos emprendimientos industriales u otros, manteniendo las condiciones naturales del reservorio subterráneo y asegurando la permanencia de una de las principales fuentes de agua potable en el Departamento.

Existen diversas metodologías para caracterizar la vulnerabilidad de un acuífero, siendo el modo de evaluación de esta característica más o menos cuantitativo en unas y otras.

Para obtener el Mapa de Vulnerabilidad del acuífero Raigón, se escogió la metodología DRASTIC, desarrollada por la E.P.A. (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos de América, por ser ésta quien considera más factores físicos y variables características de los medios subterráneos y permitir una cuantificación consistente.

DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales a las que asigna valores numéricos entre 1 y 10 de acuerdo a la importancia relativa de cada una en el proceso de existencia y expresión del agua subterránea, que se escoge de acuerdo al acuífero particular de que se trate, y un multiplicador entre 1 y 5 (peso según su importancia) recomendado por los autores del método para expresar generalidades propias del agua del subsuelo. Como resultado de esta evaluación se obtiene un mapa, mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación.

La dinámica de los sistemas acuíferos hace que los Mapas de Vulnerabilidad no sean información estática. Variaciones en las condiciones de acceso, presencia y movimiento del agua, originan cambios en las variables de estado de los sistemas. El seguimiento de estos cambios y la importancia de los mismos pueden conducir a la revisión de tales mapas, y a su modificación y corrección temporal.

El sistema hidrogeológico se desarrolla principalmente a través de la Formación Raigón, aunque se consideran zonas constituidas por la Fm. Fray Bentos, en que la conductividad hidráulica es mucho menor, y por el basamento cristalino, en que el flujo puede darse a

través del medio fisurado. Otras manifestaciones de la Formación Raigón con capacidad de almacenamiento hídrico se dan también al oeste del Arroyo Pavón en el Dpto. de San José, y se observan asimismo afloramientos en la cuenca alta del Río Santa Lucía.

La caracterización geológica e hídrica del acuífero se presenta en el artículo: "ACUÍFERO RAIGÓN – Parte 1: Caracterización geohidrológica".

CONCEPTOS BÁSICOS

El medio físico puede darle cierto grado de protección a los acuíferos al oficiar como purificador de agua contaminada cuando esta percola a través del suelo y otros estratos de la zona no saturada. El grado de atenuación que el ambiente físico pueda efectuar y el tipo de contaminante determina el potencial relativo con que un acuífero puede contaminarse.

La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea que depende de la sensibilidad de estos a impactos humanos y/o naturales, y es función de factores hidrogeológicos que determinan tanto la inaccesibilidad de la zona saturada a la penetración de contaminantes como la capacidad de atenuación de la misma y de los estratos por encima de ella. Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace variable el potencial de un acuífero para protegerse, razón para que algunas áreas sean más vulnerables que otras. Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran el área de estudio.

Los mapas de vulnerabilidad tienen múltiples propósitos y son útiles, sobre todo, a nivel gubernamental. Su principal cometido es servir de guía en la planificación de actividades relacionadas con el medio ambiente y el ordenamiento territorial, siendo una herramienta fundamental para definir qué utilización pueden tener determinadas zonas, y en el desarrollo de políticas de protección para las aguas subterráneas subyacentes a la superficie de asentamiento de actividades existentes.

METODOLOGÍA

La metodología DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales, a las que asigna valores, y un multiplicador (peso según su

importancia). Gran parte del presente trabajo consistió en la ponderación de esos siete parámetros, a saber:

- D - Profundidad al acuífero (Depth to water)
- R - Recarga neta (Recharge)
- A - Tipo de acuífero (Aquifer media)
- S - Tipo de suelo (Soil media)
- T - Topografía, Pendiente (Topography)
- I - Impacto del tipo de zona vadosa (Impact of the Vadose Zone Media)
- C - Conductividad hidráulica (Conductivity of the aquifer)

Para describir cada una de estas propiedades son necesarios estudios detallados, los que una vez concluidos se valoran en su actuación conjunta a través de la metodología y sus conceptos. Como cualquier herramienta que valora la vulnerabilidad, DRASTIC se apoya en valoraciones cualitativas, pero al ser imprescindible para su uso elementos tales como la recarga y la conductividad hidráulica, sugiere la utilización y calibración preliminar de un modelo numérico, aportando de este modo valoraciones cuantitativas específicas y aportando una visión más general y diversa de los aportes de cada propiedad al producto final.

DRASTIC permite encontrar un valor numérico para cada punto del área de trabajo mediante la siguiente ecuación:

$$D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W = \text{Indice de vulnerabilidad}$$

donde los subíndices R y W son el puntaje (rating) y el peso de ponderación (weight) respectivamente. Esta suma expresa la conjunción de las valoraciones de cada propiedad, aportadas por el método, y el conocimiento del acuífero particular del que se trata por parte de quienes lo aplican. La Tabla N°1 muestra los pesos de cada parámetro según los autores de la metodología.

Tabla N°1 - Pesos asignados a los distintos factores

Parámetro	Peso
Profundidad al acuífero	5
Recarga neta	4
Tipo de acuífero	3
Tipo de suelo	2
Topografía (pendiente)	1
Impacto de la zona vadosa	5
Conductividad hidráulica del acuífero	3

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS

Se explica en lo siguiente la selección del peso de ponderación de cada propiedad.

PROFUNDIDAD

A partir de las curvas de nivel digitalizadas se realizó una interpolación para obtener una capa de topografía que permitiera acotar los niveles de terreno para poder conocer la profundidad aproximada del nivel estático en cada punto. Por otro lado, se confeccionó la piezometría con interpolación por krigeado a partir de los niveles freáticos.

De la diferencia entre ambas capas (topografía y freatigrafía) se obtuvo el mapa de distancias entre la superficie del terreno y la superficie freática. Posteriormente se asignó a distintas zonas el puntaje correspondiente a cada rango de DRASTIC (Tabla N°2), donde, a menor profundidad, mayor es el peligro de contaminación que existe. La Figura 1 permite observar el mapa temático correspondiente.

Tabla N°2 - Puntajes utilizados para la Profundidad

Rango de Profundidades (m)	Puntaje
0.0 – 1.5	10
1.5 – 4.5	9
4.5 – 9.0	7
9.0 – 15.0	5
15.0 – 23.0	3
23.0 – 30.5	2
>30.5	1

RECARGA

Tabla N°3 - Rangos y puntajes para la recarga neta.

Recarga neta (m/día)	
Rango	Puntaje
0 - 0.00014	1
0.00014 - 0.00028	3
0.00028 - 0.00049	6
0.00049 - 0.00070	8
> 0.00070	9

La recarga se ajustó mediante modelación numérica, considerando como superficie freática la obtenida por las mediciones de la Dirección Nacional de Minería y Geología

(DINAMIGE) en octubre de 1986. En el sector sudeste, limitado por el Río de la Plata, el Río San José y los arroyos San Gregorio y Sauce, se contó con mayor cantidad de datos y mejor descripción de los mismos, por ser la zona de más uso de agua subterránea. Los niveles en los sectores ubicados al oeste y al norte del área citada se calibraron con un acuerdo aceptable, pese a las menores posibilidades debidas a la escasez de datos. De esta manera, se obtuvo el mapa temático correspondiente a la recarga hidráulica en su forma final para toda el área de estudio en régimen estacionario. Los mayores valores se corresponden con la mayor recarga. La Figura 2 muestra los puntajes DRASTIC de la variable.

TIPO DE ACUÍFERO

El sistema acuífero está constituido por la Formación Raigón. Su ambiente de deposición corresponde a fluvial en la cima y litoral en la base y parte central, en condiciones de clima seco y frío, Bossi (1988). Se constituye por arenas que varían de finas a gravas, cuarzo feldespáticas, blanco grisáceas, subangulosas, con niveles conglomerádicos y lentes de arcillas grisáceas y verdes.

La base de Raigón la componen la Formación Fray Bentos, la Formación Camacho y el Complejo Basal. Raigón se apoya sobre Camacho en concordancia estratigráfica, con pasajes gradacionales de una a otra formación. La Formación Raigón se presenta en parte cubierta por limos arcillosos de las Formaciones Libertad y Dolores, y en parte, aflorando.

La geología utilizada responde a los trabajos realizados por los geólogos De Souza, Manganeli y Almagro, en el marco del Convenio DINAMA – IMFIA y en el Proyecto CONICYT – BID. Los resultados a los cuales arribó se basaron en la revisión de trabajos anteriores, el análisis de información de perforaciones y el desarrollo de actividades de campo.

En algunas zonas de la región afloran formaciones geológicas subyacentes a la formación Raigón – Fray Bentos y Basamento Cristalino –, lo cual indica la ausencia de la misma. En estas zonas se asumió la existencia de flujo de agua a través de zonas preferentes en estas formaciones aflorantes.

Por estar el Basamento Cristalino compuesto por Gneiss, se le asignó un puntaje 3, como prevé el método para las rocas ígneas y metamórficas. La Fm. Fray Bentos está constituida por areniscas muy finas con mucho contenido de arcilla, y por lo tanto se le adjudicó el puntaje 4, que es el mínimo previsto para las areniscas. La Fm. Raigón por lo contrario está formada por areniscas finas a conglomerádicas mal seleccionadas con

estratificaciones, lo que le da un carácter poco atenuador (dada la mayor facilidad del agua para fluir y la menor área relativa de los granos para entrar en contacto con el líquido). Se asignó puntaje 8 a la Fm. Raigón. La Tabla N°4 resume los puntajes otorgados y la Figura 3 los muestra gráficamente.

Tabla N°4 - Puntajes utilizados para los materiales componentes del acuífero

Tipo de acuífero	Puntaje
Basamento Cristalino	3
Fray Bentos	4
Raigón	8

SUELO

La confección de un mapa de suelos se realizó con base en fotointerpretación y relevamientos de campo para la parte norte del acuífero (Bach. Agr. H. Perdomo), que queda excluida de la Carta de Suelos de San José elaborada por la Dirección de Suelos y Aguas del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Por otra parte, se agruparon las unidades de la Carta de Suelos para la porción sur de forma tal que resultara un mapa de suelos con escala uniforme. El criterio de agrupación de las unidades atendió siempre a la textura de los distintos tipos de suelo, siendo esta propiedad la que define el mayor o menor índice.

Luego se asignaron los puntajes, teniendo en cuenta las recomendaciones de la metodología DRASTIC, a las distintas unidades según muestra la Tabla N°5. La Figura 4 corresponde al mapa temático.

Tabla N°5 – Rangos y puntajes para los tipos de suelo

Tipo de Suelo	
Unidad	Puntaje
Playas	9
Cristalino	8
Dunas Costeras	7
Libertad sobre cristalino	7
Raigón	5
Bañados	5
Libertad / Dolores	4
Bajos	3

TOPOGRAFÍA

Tabla N°6 - Rangos y puntajes para la topografía.

Pendiente(%)	
Rango	Puntaje
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

A partir de varios modelos de topografía generados por interpolación se calcularon mediante propiedades del sistema de información geográfico GRASS las pendientes en toda el área. Los resultados fueron similares, y se eligió el modelo que arrojó valores de pendiente menores, por seguridad. Posteriormente se dividió el área en zonas según los rangos previstos por el método, y se obtuvo el mapa de las pendientes.

Puede observarse que se está frente a una topografía suave (salvo en las barrancas contra la costa), donde la oportunidad del agua para infiltrarse –y con ella los contaminantes– es alta, dependiendo del porcentaje de pendiente la posibilidad de acceso de la sustancia contaminante. La Figura 5 permite apreciar la distribución de estos puntajes.

IMPACTO DE LA ZONA VADOSA

La zona vadosa está constituida por la misma Formación Raigón en su parte no saturada y las formaciones que la cubren. En los lugares donde afloran la Fm. Fray Bentos y el Basamento Cristalino – bases de la Fm. Raigón – son estas mismas las que conforman la zona vadosa. Dadas las características de cada formación geológica se asignó a cada una de ellas el puntaje que se detalla en la Tabla N°7, en función de lo recomendado por el método. La Figura 6 muestra la distribución en el área de los puntajes obtenidos.

Tabla N°7 - Puntajes utilizados para el impacto de la zona vadosa

Formación aflorante	Puntaje
Basamento Cristalino	4
Fray Bentos	2
Raigón	8
Chuy	7
Libertad	4
Dolores	4
Villa Soriano	7
Reciente yActual	7

A los efectos de valorar el índice de vulnerabilidad hay que considerar el estrato más atenuante de los que estén por encima del nivel freático. Este estrato de menor puntaje no tiene por qué coincidir con la formación aflorante. En función de ello se estudió cada caso.

Tras el análisis de cada formación y su actuación conjunta se decidió asociar el impacto de la zona vadosa directamente a través de la Carta Geológica de Superficie.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Tabla N°8 - Rangos y puntajes para la conductividad hidráulica.

Conductividad hidráulica (m/día)	
Rango	Puntaje
0 – 4	1
4 – 12	2
12 – 28	4
28 – 41	6
41 – 82	8
>82	10

La conductividad hidráulica se obtuvo mediante modelación numérica, al igual que la recarga. La Figura 7 resume los resultados obtenidos.

CARTA DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO RAIGÓN

Los Índices máximo y mínimo de Vulnerabilidad Intrínseca para el acuífero Raigón son 194 y 51, respectivamente (1986). Los extremos posibles para cualquier acuífero (metodología DRASTIC) son 226 y 23.

De la conjunción de los mapas correspondientes a cada propiedad se obtuvo el Índice General de Vulnerabilidad para cada punto. La diferencia entre los valores máximo y mínimo obtenidos para el índice en toda el área se dividió entre tres, resultando tres rangos: bajo, medio y alto, tal como puede apreciarse en la Carta. El área que abarca la Carta es 2271 km², de los cuales 294 km² corresponden a áreas de baja vulnerabilidad (13%), 1541 km² a áreas de vulnerabilidad media (68%) y 436 km² a áreas de alta vulnerabilidad (19%).

La mayor parte del área tiene valores medios de índice de vulnerabilidad, destacándose índices bajos en las zonas elevadas del Norte y algunas zonas en el Sur. Los sectores con alta vulnerabilidad aparecen dispersos, concentrándose en zonas cercanas a los arroyos donde aflora la Fm. Raigón, o en zonas de alta recarga. La Figura 8 muestra el resultado final del trabajo.

CONCLUSIONES

El conocimiento del sistema acuífero, aun hoy, está en una etapa media, y los modelos numéricos deben someterse a correcciones parciales en geometría. Algunas condiciones de borde deben ser estudiadas particularmente (cercanías del Río San José, por ejemplo). De toda el área involucrada, un 60% carece de datos geométricos e hidráulicos rigurosamente confiables.

Sin embargo, con los datos existentes analizados y depurados, la metodología aquí expuesta y la información obtenida y procesada de cada variable en juego, la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), quien encargara y financiara esta realización, dispone a través de esta Carta de Vulnerabilidad del Acuífero Raigón de una valiosa herramienta de planificación básica, con la que se podrá seguir la evolución del sistema a través de los años, y permitirá acceder a evaluaciones de riesgo a la acción de contaminantes definidos.

El Ordenamiento Territorial y la protección del Medio Ambiente, así como los planes de monitoreo y seguimiento de actividades implantadas, se ven favorecidas por la aplicación de estas herramientas obtenidas a partir del conocimiento y estudio de los factores físicos involucrados en la protección natural de los sistemas hídricos.

BIBLIOGRAFÍA

- **Allan Freeze, R., Cherry, J.** 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, N.J., U.S.A.
- **Aller, L. et al.** 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hidrogeologic settings*. EPA/600/2-87/035, U.S.A.
- **Boulding, Russell.** 1995. *Practical handbook of soil, vadose zone, and ground-water contamination: assessment, prevention, and remediation*. Lewis Publishers. U.S.A..
- **Custodio, E., Llamas, M.** 1976. *Hidrología Subterránea* (Tomos I y II). Ediciones Omega, Barcelona, España, 2290 pgs.
- **de los Santos, J. et al.** 1998. *Modelación Numérica del Acuífero Raigón*. Proyecto CONICYT – BID 71/94. IMFIA, UdelaR. Uruguay.
- **de los Santos, J. et al.** 1999. *Carta de Vulnerabilidad del Acuífero Raigón*. Informe Final. Convenio DINAMA-IMFIA. IMFIA, UdelaR. Uruguay.

- **Foster S., Hirata, R.** 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes*. Segunda edición revisada. CEPIS OPS OMS. Perú.
- **Vrba, J. et al.** 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. International Contributions to Hydrogeology. Vol 16. Heise. Alemania.

en Suelos

- **DGRNR-MGAP**, 1984. *Grupos de Suelos Coneat e Indices de productividad*.
- **MGAP-DSA**, 1979. *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, Tomo III*.
- **MGAP-DSA**, 1979. *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, Tomo I*.

FIGURAS

Figura 1. Metodología DRASTIC – Profundidades de 1986

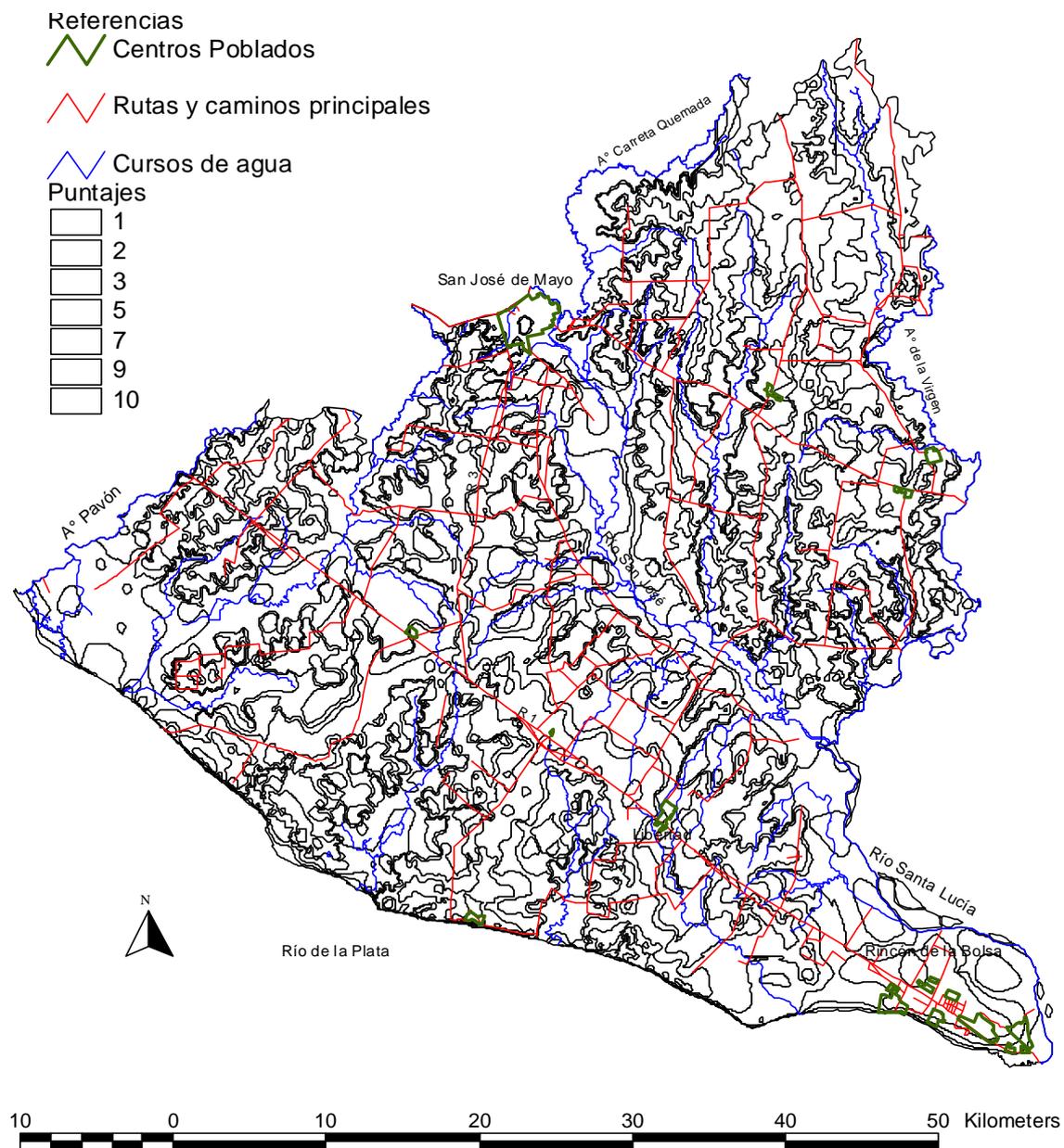


Figura 2. Metodología DRASTIC - Recarga

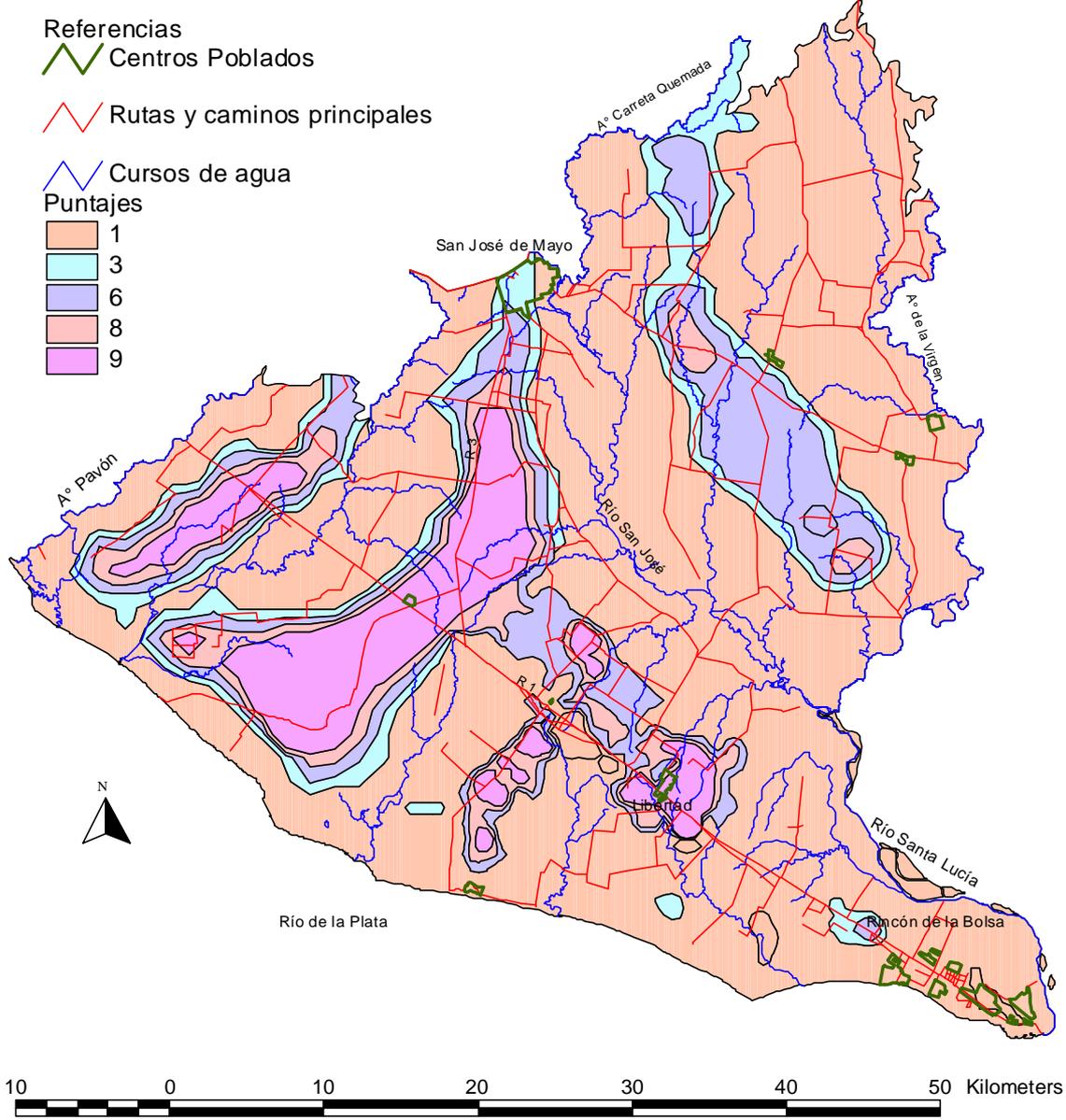


Figura 3. Metodología DRASTIC - Acuífero

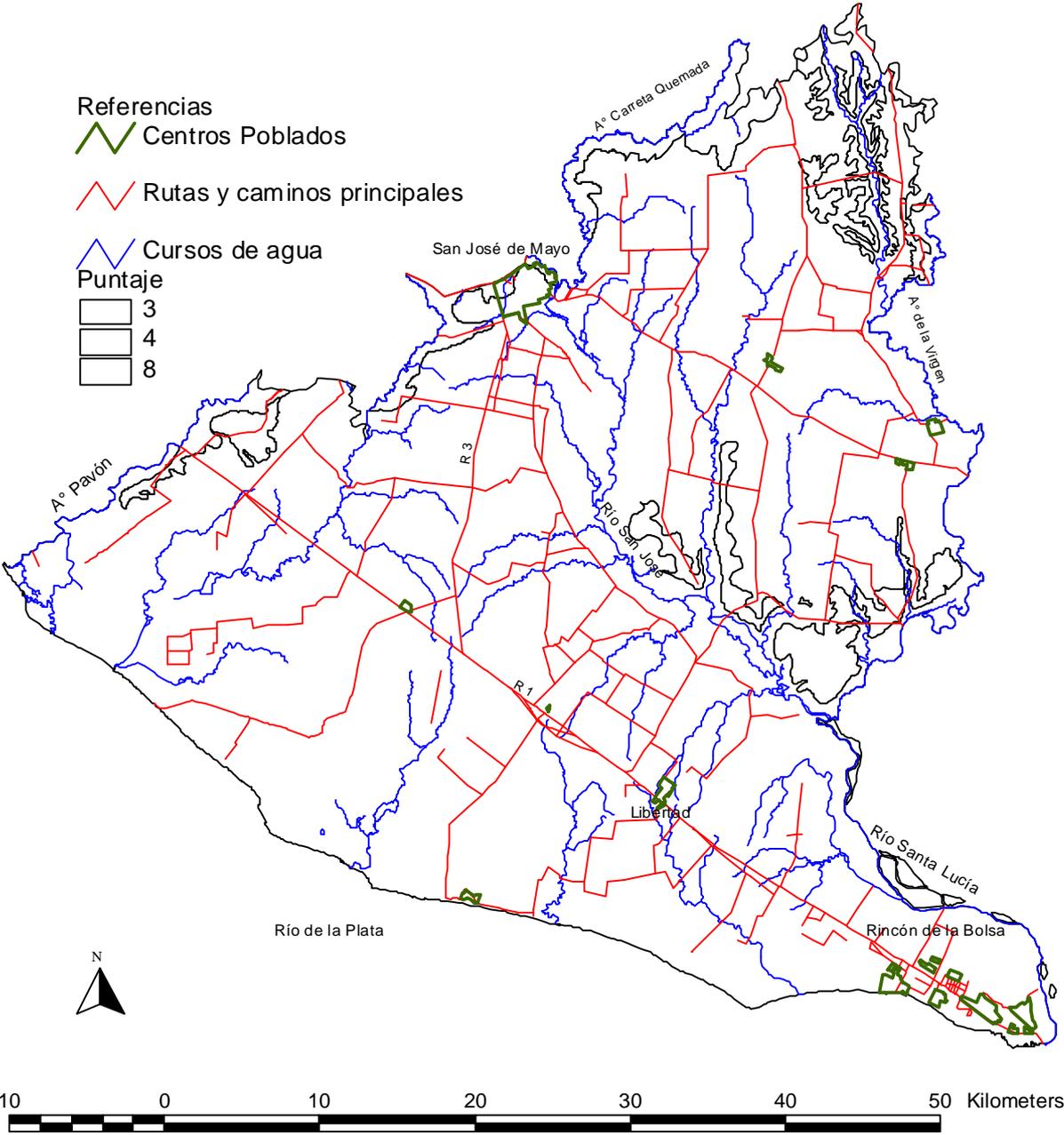


Figura 4. Metodología DRASTIC - Suelo

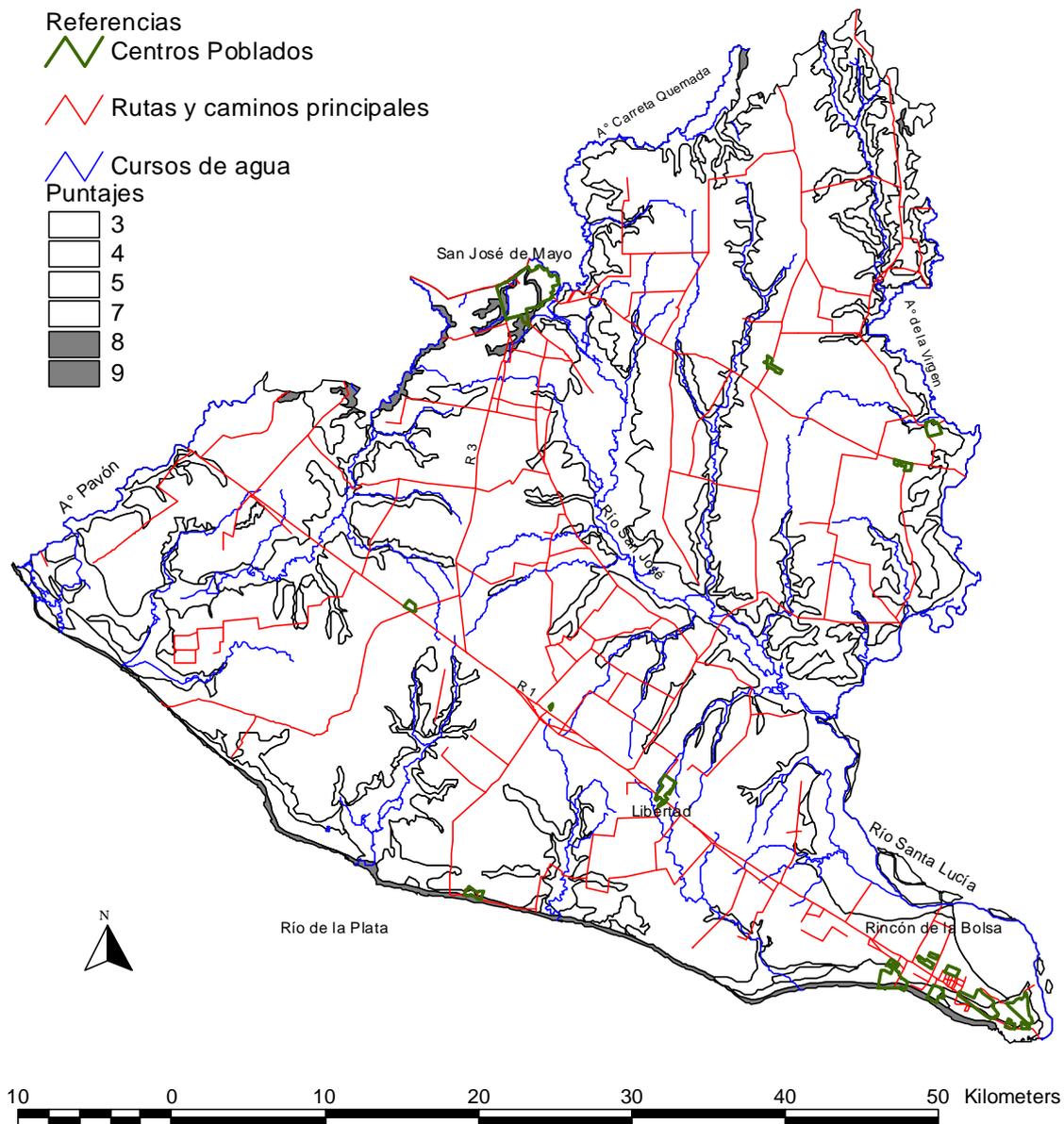


Figura 5. Metodología DRASTIC - Topografía

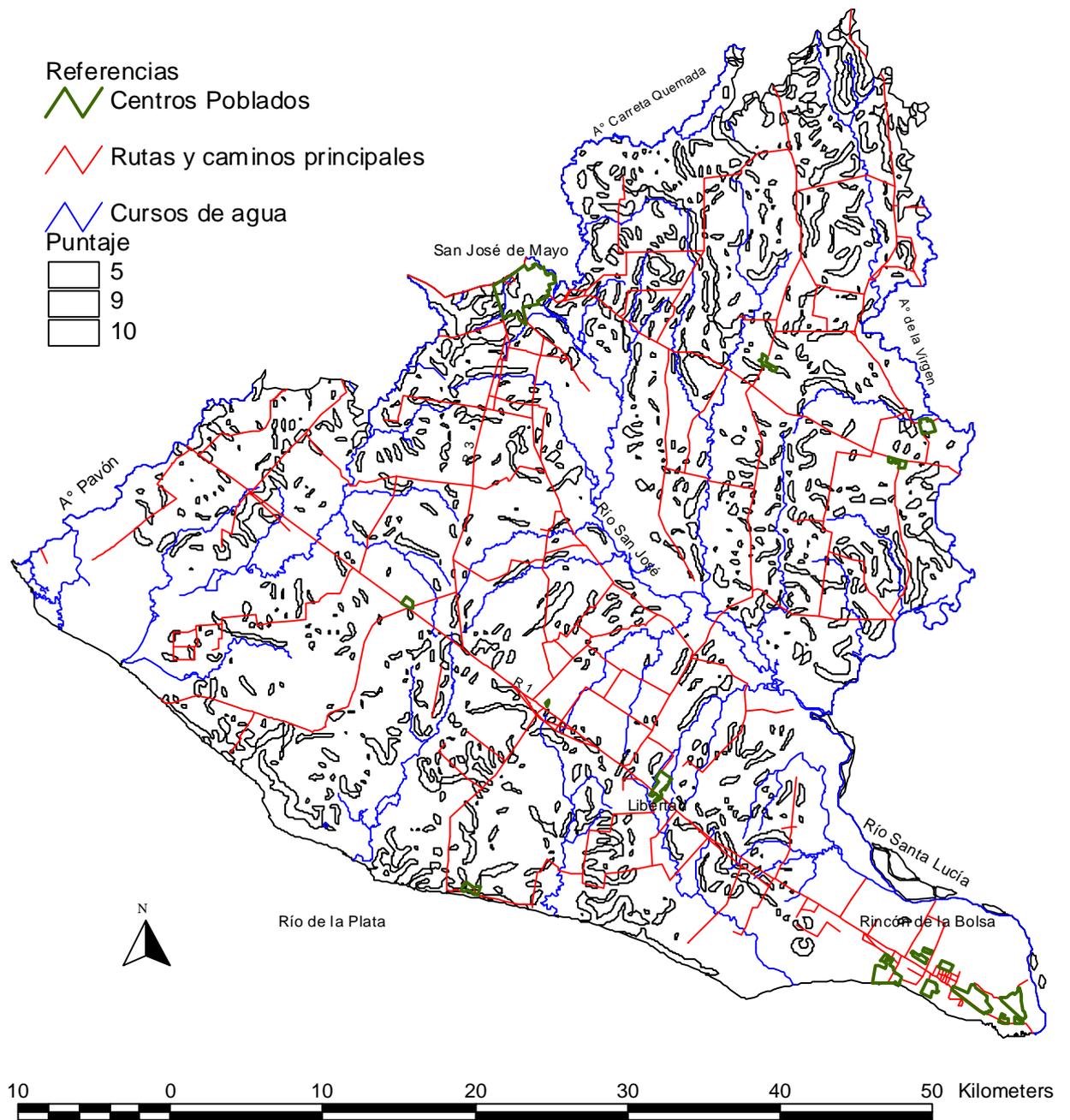


Figura 6. Metodología DRASTIC - Impacto de la Zona Vadosa

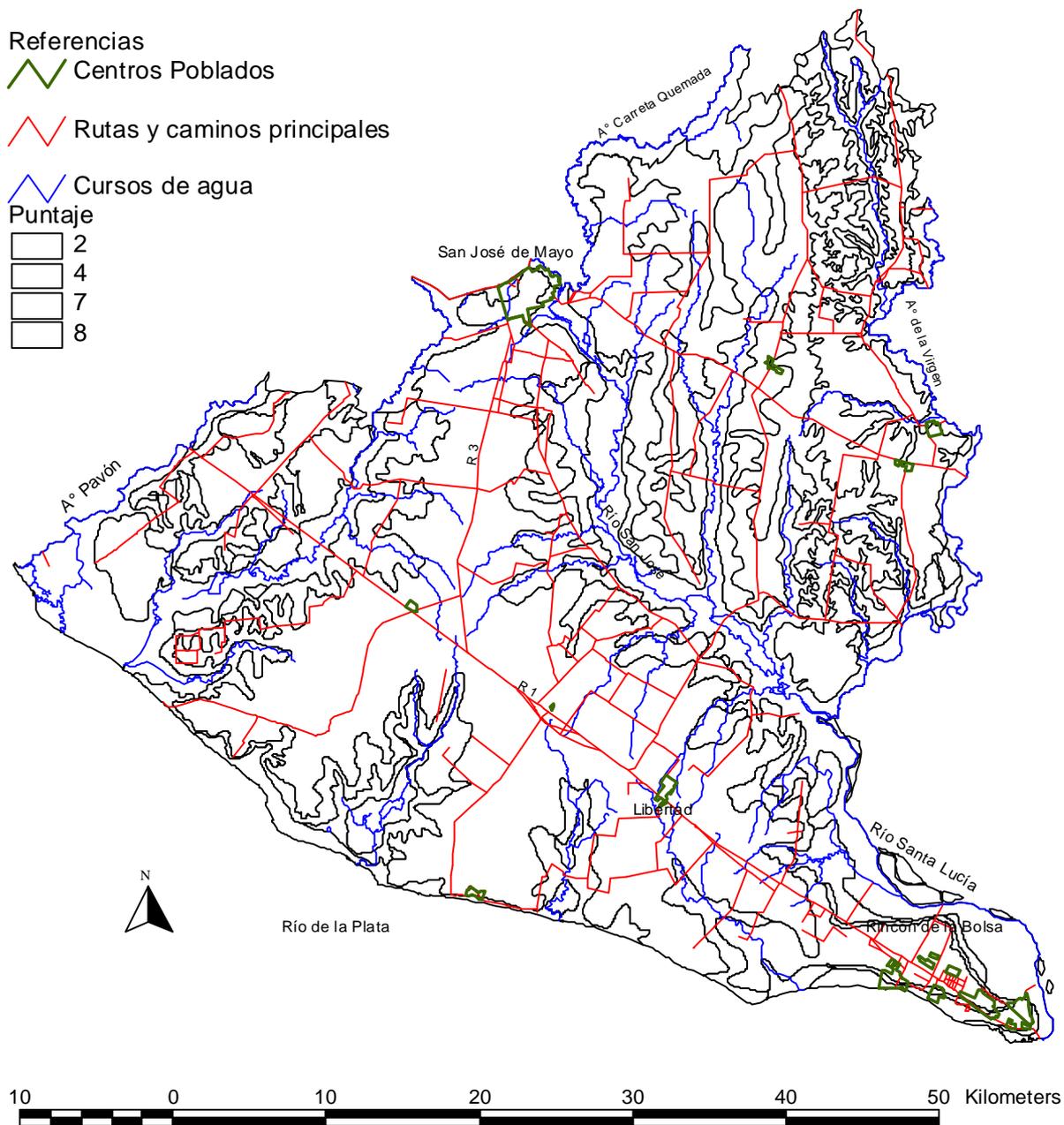


Figura 7. Metodología DRASTIC - Conductividad Hidráulica

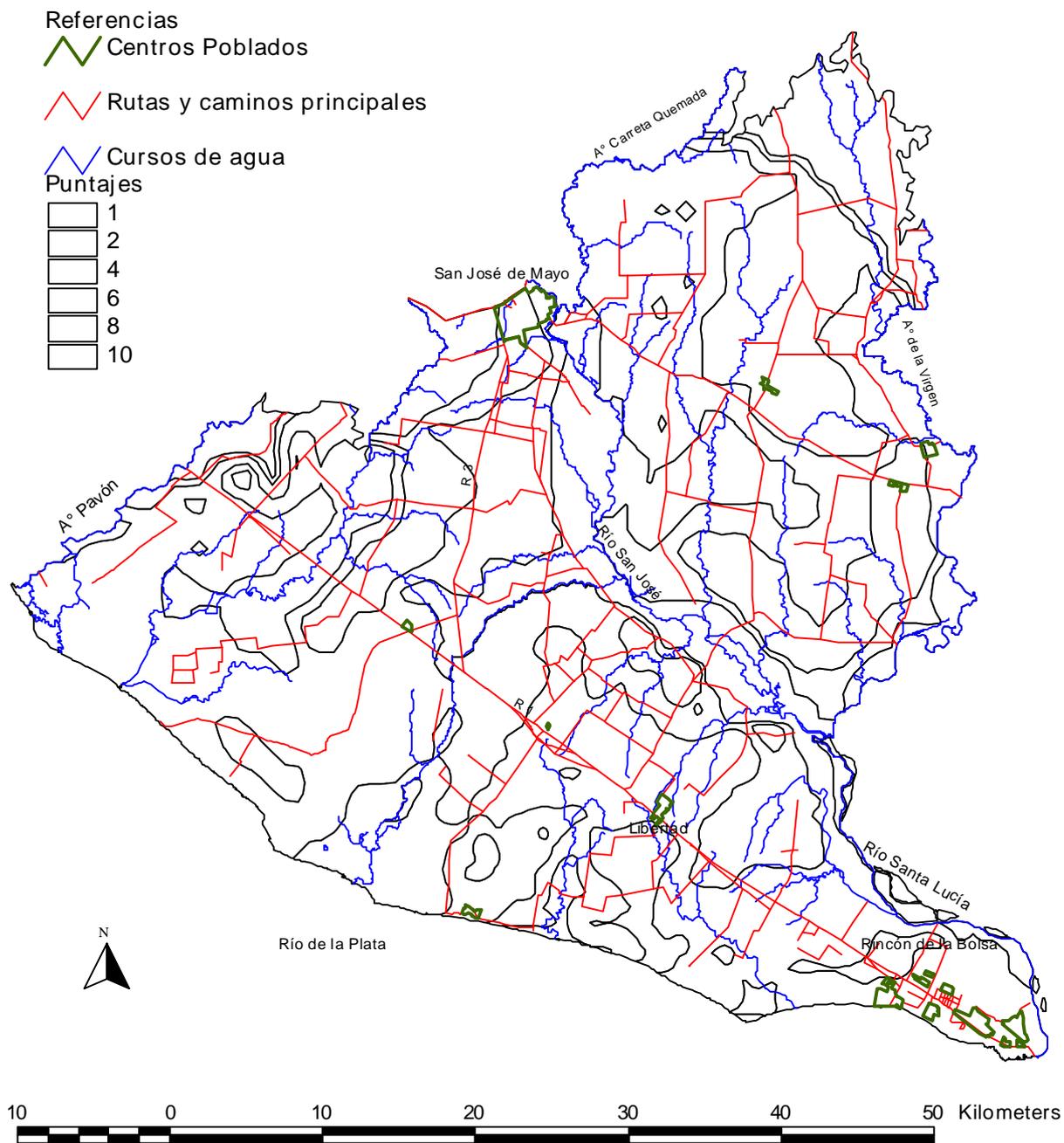


Figura 8. Metodología DRASTIC – Carta de Vulnerabilidad General del Acuífero Raigón

