

PROYECTO TÍPICO. APLICACIÓN DE UN GIS PARA EVALUAR IMPACTOS AMBIENTALES

ÍNDICE

1. EJEMPLO HIPOTÉTICO DE APLICACIÓN DE UN GIS: EVALUACIÓN DE LA APTITUD AMBIENTAL PARA LA INSTALACIÓN DE UN ACUEDUCTO	1
1.1. OBJETIVOS Y ALCANCES	1
1.2. SELECCIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES REPRESENTATIVAS	2
1.3. CRITERIOS PARA LA VALORACIÓN DE APTITUD AMBIENTAL	2
1.3.1. <i>Aptitud Ambiental Según la Geomorfología.....</i>	<i>3</i>
1.3.2. <i>Aptitud Ambiental Según las Características Geotécnicas de los Suelos</i>	<i>4</i>
1.3.3. <i>Aptitud Ambiental Según la Profundidad de la Primera Napa</i>	<i>4</i>
1.3.4. <i>Aptitud Ambiental Según la Vegetación</i>	<i>5</i>
1.3.5. <i>Aptitud Ambiental Según las Áreas Naturales Protegidas.....</i>	<i>6</i>
1.3.6. <i>Aptitud Ambiental Según el Uso del Suelo</i>	<i>6</i>
1.3.7. <i>Aptitud Ambiental Según la Accesibilidad.....</i>	<i>7</i>
1.3.8. <i>Aptitud Ambiental Según la Distancia al Borde del Área Urbana.....</i>	<i>8</i>
1.4. ELABORACIÓN DE MAPAS DE APTITUD AMBIENTAL.....	8
1.4.1. <i>Procedimiento Analítico</i>	<i>8</i>
1.4.2. <i>Distribución de la Aptitud Ambiental Según Recursos</i>	<i>10</i>
1.4.3. <i>Distribución de la Aptitud Ambiental Global.....</i>	<i>13</i>
1.5. IDENTIFICACIÓN, COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE TRAZAS ALTERNATIVAS SEGÚN LA APTITUD AMBIENTAL	14

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Variables consideradas en la evaluación de aptitud ambiental para la instalación del acueducto.....	2
Tabla 2. Categorías de aptitud ambiental para la instalación de un acueducto.....	3
Tabla 3. Criterios de aptitud ambiental según la geomorfología.....	3
Tabla 4. Criterios de aptitud ambiental según las características geotécnicas de los suelos	4
Tabla 5. Criterios de aptitud ambiental según la profundidad de la primera napa.....	5
Tabla 6. Criterios de aptitud ambiental según la vegetación.....	5
Tabla 7. Criterios de aptitud ambiental según las áreas naturales protegidas	6
Tabla 8. Criterios de aptitud ambiental según el uso del suelo.....	7
Tabla 9. Criterios de aptitud ambiental según la accesibilidad	7
Tabla 10. Criterios de aptitud ambiental según la distancia al borde del área urbana	8
Tabla 11. Valores de los VIP utilizados para ponderar las variables ambientales en la determinación de la aptitud ambiental integral.....	10
Tabla 12. Distribución de la aptitud ambiental según la geomorfología.....	10
Tabla 13. Distribución de la aptitud ambiental según las características geotécnicas de los suelos ...	11
Tabla 14. Distribución de la aptitud ambiental según la profundidad de la primera napa	11
Tabla 15. Distribución de la aptitud ambiental según la vegetación	11
Tabla 16. Distribución de la aptitud ambiental según las áreas naturales protegidas	12
Tabla 17. Distribución de la aptitud ambiental según el uso del suelo	12
Tabla 18. Distribución de la aptitud ambiental según la accesibilidad	12
Tabla 19. Distribución de la aptitud ambiental según la distancia al borde del área urbana	13
Tabla 20. Distribución de la aptitud ambiental global	13
Tabla 21. Aptitud ambiental global para las trazas alternativas	15

MAPAS

Mapa 1. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la geomorfología.....	16
Mapa 2. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según las características geotécnicas de los suelos.....	17
Mapa 3. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la profundidad de la primera napa.....	18
Mapa 4. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la vegetación.....	19
Mapa 5. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según las áreas naturales protegidas.....	20
Mapa 6. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según el uso del suelo.....	21
Mapa 7. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la accesibilidad.....	22
Mapa 8. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la distancia al borde del área urbana.....	23
Mapa 9. Mapa de aptitud ambiental integral para la instalación de un acueducto. ubicación de trazas alternativas.....	24

1. EJEMPLO HIPOTÉTICO DE APLICACIÓN DE UN GIS: EVALUACIÓN DE LA APTITUD AMBIENTAL PARA LA INSTALACIÓN DE UN ACUEDUCTO

1.1. OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo del presente ejemplo es desarrollar la aplicación de un Sistema de Información Geográfica (GIS) en evaluaciones de impacto ambiental a través de un estudio de caso hipotético. En este ejemplo se identifican, valoran y cuantifican zonas ambientalmente sensibles (o aptas) para la instalación de un acueducto en el área de influencia de una localidad de la Provincia de Córdoba. Se seleccionó dicha área para este estudio de caso debido a que se cuenta con una base de datos de la región, lo cual facilita la aplicación del método.

La realización de un estudio de este tipo debe justificarse en cada caso particular, debiéndose destacar que deben plantearse inicialmente las alternativas técnicas y económicas y luego de seleccionadas las más convenientes proceder a la evaluación ambiental de las mismas.

Debe aclararse que en este caso sólo se evalúan los impactos potenciales generados por la instalación del acueducto, es decir que no se consideran algunos aspectos relevantes tales como la selección de la fuente de captación e impactos producidos por un eventual trasvase de cuencas.

El objetivo general de la aplicación de un GIS en este estudio es el de contribuir a identificar, según criterios ambientales, las trazas de un acueducto entre diferentes alternativas técnicas posibles para conectar dos puntos en el espacio. Es decir, indicar las trazas que atraviesen las zonas más aptas (en donde los impactos ambientales potenciales son menores) para la instalación de un acueducto.

El procedimiento de aplicación del GIS se llevó a cabo en seis etapas:

- 1). Selección de variables ambientales representativas.
- 2). Definición de criterios para la valoración de la aptitud ambiental.
- 3). Elaboración de mapas temáticos de aptitud (o restricción) ambiental.
- 4). Elaboración de un mapa integral de aptitud ambiental.
- 5). Identificación de trazas alternativas para la instalación de un acueducto.
- 6). Comparación y selección de la traza ambientalmente menos desfavorable para la instalación de un acueducto.

Debe destacarse el hecho de que la selección de las trazas que minimizan los impactos sobre el medio debe realizarse, inequívocamente, una vez evaluada la aptitud ambiental del área en donde se llevará a cabo el proyecto.

1.2. SELECCIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES REPRESENTATIVAS

La selección de variables en este caso se realizó en función de los datos existentes (**Tabla 1**), pero la mayor parte de las variables utilizadas son representativas de la realidad ambiental y social del área del estudio. Sin embargo, en otras áreas pueden existir otras variables ambientales relevantes para la evaluación de un proyecto de las características del presente ejemplo, las cuales deben ser tenidas en cuenta en el análisis.

Cabe resaltar que la selección de las variables para evaluar la sensibilidad ambiental de una región a un determinado proyecto constituye una etapa en sí misma.

Tipo	Variable
Física	Geomorfología
	Características Geotécnicas del Suelo
	Profundidad de la Primera Napa
Biológica	Vegetación
	Áreas Naturales Protegidas
Antrópica	Usos del Suelo
	Accesibilidad
	Distancia al del Borde Area Urbana

Tabla 1. Variables consideradas en la evaluación de aptitud ambiental para la instalación del acueducto

1.3. CRITERIOS PARA LA VALORACIÓN DE APTITUD AMBIENTAL

A cada variable ambiental considerada para la evaluación de aptitud se le asignó, bajo la forma de un Índice de Aptitud Ambiental (IAA), una escala de valores de aptitud que varía entre 0 y 1, siendo 0 aquellos casos no aptos o restrictivos y 1 los de aptitud máxima, óptima o sin restricciones. Al asignar tales valores se consideró, implícitamente, una relación inversa entre la aptitud y los impactos ambientales potenciales que podría generar la instalación del acueducto: a mayor aptitud menor impacto ambiental.

La asignación de valores de aptitud fue realizada por distintos especialistas en base al grado de susceptibilidad de cada unidad o condición ambiental ante la incidencia de las acciones y obras de instalación de un acueducto. Al analizar la susceptibilidad de cada condición ambiental se tuvo en cuenta, especialmente, su capacidad de asimilación de las posibles alteraciones sin pérdida significativa de calidad y funcionalidad. Esta valoración abarcó, asimismo, consideraciones tales como duración, intensidad y grado de reversibilidad de los impactos según los criterios establecidos en cada caso y para cada unidad o condición ambiental analizada.

Se consideró como aptitud tolerable para la instalación del acueducto, a los valores ≥ 0.6 de aptitud ambiental. En la **Tabla 2** se indican las categorías de aptitud ambiental establecidas.

Condición de Aptitud Ambiental	Valor del IAA
Óptimo	≥ 0.9
Deseable	0.8 – 0.89
Aceptable	0.7 – 0.79
Tolerable	0.6 – 0.69
No Tolerable	0.01 – 0.59
No Apto / Restringido	0.0

Tabla 2. Categorías de aptitud ambiental para la instalación de un acueducto

A continuación se explican los criterios utilizados en la asignación de los valores de aptitud ambiental para cada variable en el área de estudio.

1.3.1. Aptitud Ambiental Según la Geomorfología

Los riesgos de inundación, que dificultan la accesibilidad, la construcción, las tareas de mantenimiento e incrementan los problemas de corrosión, están directamente ligados a la geomorfología, por lo que ésta es una de las variables que más influyen sobre la aptitud del terreno para la construcción de un acueducto.

Por otra parte, dado que la construcción involucra la eliminación, parcial o total, de la cobertura vegetal debe tenerse en cuenta también la susceptibilidad a la erosión del terreno.

Categoría Geomorfológica	Valor de aptitud	Características
Lomas loésicas planas	0.9	Por no tener procesos erosivos intensos ni ser zonas inundables, constituyen la única subunidad geomorfológica sin impedimentos directos para la instalación del acueducto.
Planos aluviales levemente deprimidos	0.3	Su escasa pendiente y su drenaje impedido ofrecen problemas de anegamiento que, aunque son temporarios y aislados, le confieren a esta geoforma un bajo valor de aptitud.
Paleoalbardón	0.0	Su gruesa granulometría y relieve los hacen muy vulnerables y no aptos para la instalación del acueducto.
Bajos longitudinales de acumulación temporaria	0.0	Todas estas geoformas son susceptibles de inundarse debido a que suelen conducir volúmenes importantes de agua que se concentran con las precipitaciones extraordinarias. En los bajos longitudinales de acumulación temporaria este fenómeno de acumulación sucede en menor intensidad.
Bajo inundables	0.0	
Canal de estiaje	0.0	Las tres primeras subunidades están vinculadas al cauce actual del río, y tienen sedimentos altamente permeables, están próximos al nivel de la freática, y tienen un alto riesgo de inundación (de hecho el canal de estiaje está siempre ocupado por agua), por lo que ninguna de ellas es apta. Lo mismo vale para la subunidad Barranca, que está vinculada a las anteriores y en algunos casos presenta taludes susceptibles a erosionarse.
Lecho ordinario	0.0	
Terraza	0.0	
Barranca	0.0	
Paleomeandro	0.0	Con sedimentos arenosos y con depresiones en el centro que favorecen la concentración de agua, estas geoformas tampoco son aptas para la instalación del acueducto.
Laguna	0.0	

Tabla 3. Criterios de aptitud ambiental según la geomorfología

En la **Tabla 3** se presentan las propiedades de las distintas geoformas identificadas en el área de influencia del río, y se detallan los valores de aptitud ambiental según sus características.

1.3.2. Aptitud Ambiental Según las Características Geotécnicas de los Suelos

Las características geotécnicas de los suelos también representan un factor ambiental relevante en la selección de la traza más adecuada para la instalación de un acueducto. Los distintos tipos de suelo presentan diferente estabilidad de taludes, susceptibilidad a la erosión y resistencia a la excavación, pudiendo ser necesario en algunos casos el uso de explosivos.

En la **Tabla 4** se reproducen estas propiedades y se detallan los valores de aptitud ambiental de los suelos según sus características geotécnicas.

Tipo de suelo	Suscept. Erosión	Estabilidad de taludes	Valor de aptitud	Características geotécnicas
Consociación Villa del Rosario	Ligera-Moderada	Alta	0.8	Resistentes en seco disminuyendo sus condiciones cuando se los satura. Al corte o excavación presentan paredes verticales que no se desmoronan. Hasta los 10 m de profundidad suele haber dos o tres capas de tosca.
Consoc. Manfredi	Ligera-Moderada	Media-alta	0.6	En profundidad presentan características similares a las del grupo anterior
Compl. Matorrales Impira-Costasacate	Ligera-Moderada	Media-alta	0.6	Comportamiento muy similar a los de la Consociación Villa del Rosario, en el sentido de que al corte presentan taludes verticales y niveles de tosca a distintas profundidades. Como es una zona muy heterogénea debido a su proximidad con el río, pueden existir capas arenosas aisladas.
Compl. Matorrales – La Reyna	Ligera-Moderada	Baja	0.3	Se anegan ocasionalmente por períodos de corta duración, y en los que suele intervenir el nivel freático que se encuentra cercano a la superficie. Esto hace que por épocas tengan el drenaje impedido.
Complejo Río Segundo – Pilar	Moderada-Alta	Baja	0.1	En profundidad son suelos con características geotécnicas dispares. Las capas de arena suelen ser muy aptas para fundaciones, pero sus paredes se desmoronan con facilidad.

Tabla 4. Criterios de aptitud ambiental según las características geotécnicas de los suelos

1.3.3. Aptitud Ambiental Según la Profundidad de la Primera Napa

Se tuvo en cuenta esta variable en el análisis de aptitud ambiental dado que la profundidad a la cual se halla la primera napa está asociada con la posibilidad de alteración de su calidad debido a tareas de construcción (excavaciones excesivas,

derrames accidentales de sustancias contaminantes) o procesos que pueden ocurrir durante la operación del acueducto (pérdidas o infiltraciones importantes de agua, corrosión de la cañería). En la **Tabla 5** se detallan los valores de aptitud para las distintas profundidades identificadas en el área de estudio.

Categorías de profundidad	Valor de aptitud
> -10 m	1.0
-5 m a -10 m	0.9
-3 m a -5 m	0.6
< -3 m	0.4

Tabla 5. Criterios de aptitud ambiental según la profundidad de la primera napa

1.3.4. Aptitud Ambiental Según la Vegetación

La construcción de un acueducto trae aparejada la eliminación, parcial o total, de la vegetación en una franja a lo largo del recorrido del mismo, fundamentalmente por la necesidad de realizar excavaciones.

La magnitud del impacto generado aumenta en función de la diversidad de especies y el valor conservativo del tipo de vegetación. En la **Tabla 6**, se describen los tipos de vegetación existentes en el área de influencia del río y sus valores de aptitud en función de estas características.

Tipo	Valor de aptitud	Observaciones
Vegetación nativa extirpada	1.0	Sitios carentes de todo tipo de vegetación (ripietas, asentamientos rurales, caminos).
Forestaciones y bosques implantados	0.9	Comunidades generadas fundamentalmente por la intervención antrópica. Si bien no son de muy alto valor conservativo en cuanto a la vegetación, sí lo pueden ser en cuanto a la fauna, pudiendo constituir refugios para las mismas en zonas muy alteradas.
Arbolado urbano	0.7	
Comunidades rurales	0.5	
Bosque alineados	0.3	Poseen una considerable riqueza de especies relativamente poco perturbadas.
Matorral	0.1	En ausencia de perturbaciones estas zonas pueden generar comunidades vegetales similares a las que se registran actualmente en los relictos de espinal.
Bosque en islas del río	0.0	Poseen una considerable riqueza de especies relativamente poco perturbadas.
Relictos del Espinal	0	Representan la unidad más próxima a lo que eran los bosques originales que dominaban la región, son los de mayor riqueza y valor conservativo. Estas comunidades vegetales están prácticamente desprotegidas en las unidades de conservación existentes (Parques Nac., Parques Prov., Reservas). Se ha considerado que la preservación de los relictos de espinal es indispensable.
Corredores	0	Mantienen conectados los escasos manchones de bosque que aún se conservan y sirven de vía para la dispersión y colonización de las especies nativas. Tienen un valor conservativo análogo o mayor (por sus funciones emergentes) a los relictos de espinal.

Tabla 6. Criterios de aptitud ambiental según la vegetación

1.3.5. Aptitud Ambiental Según las Áreas Naturales Protegidas

Las comunidades del Espinal son la unidad vegetal más representativa dentro del área de estudio considerada. Sin embargo, apenas el 0.1% de la superficie que ocupa dicha unidad en Argentina (10.914.719 ha) está protegida (APN 1994). En esa porción protegida (11917 ha) de los espinales no hay reservas con categorías de manejo estrictas, y el 99.4% del área posee un control nulo a mínimo insuficiente. Sólo 134 ha preservan esta fisonomía en la Provincia de Córdoba (Reserva Ecológica Suquía, de 66 ha, y Reserva Natural Parque Tau, de 68 ha); el resto corresponde a Santa Fé (7 reservas de entre 15 y 6000 ha). Por lo tanto, la protección efectiva del Espinal es prácticamente nula. Posiblemente sea la unidad fitogeográfica del país más comprometida en cuanto a su conservación.

Esta unidad de transición entre las planicies subtropicales del Chaco y las templadas de la Pampa ha sufrido un intenso proceso de transformación antrópica, asociada a la actividad agrícola-ganadera, que consistió en desmonte, reemplazo por cultivos, y la consiguiente extirpación y/o reducción numérica de la fauna nativa, especialmente de vertebrados. A esta misma escala sería de gran valor promover la conservación de los corredores remanentes de vegetación nativa, ya que es muy probable que a mediano plazo resulten los únicos hábitats para la fauna nativa en toda la región de la Pampa y el Espinal.

Por todos estos motivos las áreas protegidas proyectadas en el río han sido considerados sitios inaptos para la instalación de un acueducto (**Tabla 7**), mientras que las zonas destinadas a áreas protegidas potenciales (franja de 200 m de amortiguación a lo largo de la ribera del río) tienen una muy baja aptitud ambiental.

Categorías	Valor de aptitud
Sin interés actual como Area Protegida	1.0
Áreas Protegidas potenciales	0.1
Áreas Protegidas proyectadas	0.0

Tabla 7. Criterios de aptitud ambiental según las áreas naturales protegidas

1.3.6. Aptitud Ambiental Según el Uso del Suelo

Existen diferentes grados de conflictos (incluyendo la incompatibilidad) entre la instalación de un acueducto y algunos de los usos actuales o potenciales del suelo, sobre todo por los efectos sobre el paisaje al eliminarse la vegetación, las molestias y problemas causados a la población durante la construcción del mismo, o debido a inundaciones por roturas y tareas de mantenimiento.

Las áreas con un alto nivel de incompatibilidad (y por lo tanto restrictivas) son, por un lado, las utilizadas con fines recreativos y los lugares de interés histórico-turístico debido a su alto valor estético y/o cultural, y por otro, las zonas urbanas, las industrias y las viviendas rurales. En estas últimas se consideraron dos áreas de influencia: una zona

restrictiva (IAA = 0) alrededor de la vivienda de radio = 50 m, y un área de amortiguación alrededor de la anterior hasta los 100 m de radio desde el baricentro de la vivienda.

Fuera del área urbana, el grado de conflictos con los usos del suelo es un poco menor, aunque no tolerable en el caso de las áreas destinadas a la explotación agrícola-ganadera. Los valores de aptitud varían en este caso dependiendo del valor de las actividades económicas destinadas al suelo. El máximo de aptitud se establece en las áreas sin uso antrópico y de bajo valor conservativo, y en los bordes de caminos por tratarse de áreas ya impactadas (**Tabla 8**).

Para el caso de la red vial se consideró que la franja ubicada a 50 m del eje de la misma es, en general, una de las condiciones más adecuadas para la instalación de un acueducto. Se asignó un IAA = 1 a esta franja debido a que este sector pertenece a una zona de servidumbre, ya ha sido ambientalmente afectada por las obras viales, y está facilitada la accesibilidad para tareas de mantenimiento.

Categorías	Valor de aptitud	Observaciones
Excavaciones	1.0	Fuera del área urbana
Red vial (indirecta)	1.0	Con zona de amortiguación de contorno de 50 m
Sin uso actual – Abandonado	0.6	Con zona de amortiguación de 50-100 m
Red vial (directa)	0.5	
Viviendas Rurales	0.5	
Ganadería – Pasturas	0.4	
Uso agropecuario potencial	0.4	Con zona de amortiguación de radio de 50 m
Cultivos	0.3	
Viviendas Rurales	0.0	
Area Urbana	0.0	
Industrias	0.0	
Recreativo	0.0	

Tabla 8. Criterios de aptitud ambiental según el uso del suelo

1.3.7. Aptitud Ambiental Según la Accesibilidad

Una de las variables a tener en cuenta en la selección de la traza para la instalación de un acueducto es su accesibilidad. Los caminos de tierra reciben los valores de aptitud más bajos, ya que las lluvias, particularmente en verano, podrían condicionar el acceso e interferir con las tareas de construcción o mantenimiento. En el otro extremo, los caminos asfaltados en buen estado reciben los valores más altos de aptitud. En la **Tabla 9** se presentan los criterios utilizados (tipo de camino y distancia al mismo) para valores discretos de aptitud ambiental.

Categorías de accesibilidad (Distancia a la red vial)	Valor de aptitud
Asfalto en buenas condiciones, a < 200 m	1.0
Asfalto a 200-600 m; Consolidado bueno a < 200 m	0.9
Asfalto a > 600 m; Consolidado a 200-600 m	0.8
Consolidado a > 600 m ; Tierra a < 200 m	0.7
Tierra a > 200 m	0.6

Tabla 9. Criterios de aptitud ambiental según la accesibilidad

1.3.8. Aptitud Ambiental Según la Distancia al Borde del Área Urbana

Dado las molestias que podrían causar las obras de construcción del acueducto, así como posibles roturas o tareas de mantenimiento en la etapa de operación del mismo, se consideró importante incluir la variable distancia al borde del área urbana en el análisis de aptitud.

Se otorgó el valor más bajo de aptitud a las zonas comprendidas en un radio de 500 m desde el perímetro del ejido urbano y cuatro categorías de aptitud no tolerable, previendo la posibilidad de desplazamiento del perímetro como consecuencia del crecimiento de la ciudad.

En la **Tabla 10** se detallan los valores de aptitud para distintos rangos de distancias de la ciudad. Sólo se tuvo en cuenta la situación territorial sobre la margen izquierda del río.

Categorías de distancia (km)	Valor de aptitud	Observaciones
> 8.5	1	Se considera sólo la margen izquierda del río
5.0-8.5	0.9	
2.5-5.0	0.8	
2.0-2.5	0.4	
1.5-2.0	0.3	
1.0-1.5	0.2	
0.5-1.0	0.1	
< 0.5	0.0	

Tabla 10. Criterios de aptitud ambiental según la distancia al borde del área urbana

1.4. ELABORACIÓN DE MAPAS DE APTITUD AMBIENTAL

1.4.1. Procedimiento Analítico

Se adaptó el método ABC (Bastedo *et al.* 1984) de manera de integrar las variables abióticas, biológicas, y culturales o sociales en tres niveles secuenciales:

- 1). Elaboración de mapas temáticos con información base.
- 2). Valoración estandarizada de los recursos (categoría de aptitud de cada variable ambiental).
- 3). Delimitación y zonificación de áreas según su grado de aptitud ambiental global.

La elaboración de los mapas temáticos socioambientales se realizó mediante la digitalización en sistema CAD de información básica (**Nivel 1** de Integración Ambiental).

A cada una de las variables evaluadas se le asignaron valores de aptitud en base a los criterios anteriormente descritos y siguiendo un modelo compensatorio (Hwabg & Yoon 1981), mediante un método de ponderación aditiva simple evaluando la aptitud de cada recurso en una escala 0-1 (**Nivel 2** de Integración Ambiental).

El mapa de aptitud ambiental integral se obtuvo mediante la superposición de los mapas temáticos individuales aplicando un modelo de promedios ponderados mediante un Valor de Importancia del Parámetro (VIP), lo que permitió obtener el valor resultante de los Índices de Aptitud Ambiental (IAA) integral. Posteriormente se re-categorizó el valor resultante en once categorías desde máxima aptitud (1) a inaptitud total (0) (**Nivel 3** de Integración Ambiental).

La ponderación fue realizada tanto para disminuir el efecto no deseado de la interdependencia entre variables (es decir, condiciones ambientales evaluadas por más de una variable) como para focalizar aquellos aspectos ambientalmente más relevantes (e.g. factores mas sensibles al impacto ambiental de un acueducto) o de mayor interés para el contexto social bajo estudio (e.g. factores emblemáticos o de alto simbolismo para las comunidades afectadas).

La ponderación de las variables utilizadas mediante VIPs (**Tabla 11**) consistió en tres pasos:

- 1). Jerarquización de las variables: 1 (más importante) a 8 (menos importante), en forma secuencial a fin de representar cada subsistema ambiental (físico, biológico, antrópico).
- 2). Asignación de un valor de importancia relativa de cada variable en función al parámetro más importante de entre los evaluados.
- 3). Estandarización de los VIPs (porcentaje de la sumatoria de VIPs relativos).

La asignación de valores VIPs fue realizada por distintos especialistas de modo iterativo hasta alcanzar valores de consenso (menos del 5% de diferencia). Se tuvieron en cuenta criterios basados en estudios de base, en las recomendaciones de la bibliografía de cada especialidad, y en la experiencia personal.

Si bien el rango de variación posible de los IAA es de 0 a 1, esto normalmente no sucede ya que por tratarse de un índice que proviene de una multiplicación entre otros (que varían entre 0 y 1), tiende a presentar valores más bajos (la distribución de los valores presenta un desplazamiento hacia los valores menores). Por eso, es conveniente reescalar los valores de IAA obtenidos llevando el máximo a 1 de forma tal de hacer más sencilla la visualización de las áreas donde se esperan los mayores impactos ambientales (zonas no aptas o de baja aptitud).

A partir de estos valores relativizados del IAA se elaboró el mapa de aptitud ambiental integral del área de estudio agrupando la variación resultante en once categorías desde aptitud nula o restricción total (0.0) a máxima aptitud (1.0).

Para todos los procedimientos que involucraron elaboración de mapas y análisis espaciales, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (GIS) mediante el programa SPANSTM (SPatial ANalysis System). La información digitalizada en CAD fue convertida como vectores poligonales para la elaboración de los mapas ambientales. El nivel de

resolución utilizado para la elaboración de mapas fue de 27.48 m² (unidades pixel de 5.24 x 5.24 m).

Tipo	Variable	Dependiente de	Vip	Ponderación (%)
Física	Geomorfología		1,00	15,87
Antrópica	Usos del suelo	Geomorfología	0,95	15,08
Biológica	Vegetación	Geomorfología	0,90	14,29
Física	Carac. Geotécnicas del suelo	Geomorfología	0,85	13,49
Antrópica	Accesibilidad	Usos del suelo	0,80	12,70
Biológica	Áreas naturales protegidas	Vegetación	0,70	11,11
Física	Profundidad de la primera napa	Geomorfología	0,60	9,52
Antrópica	Distancia al borde área urbana	Usos suelo, accesibilidad	0,50	7,94
VIP: Valor de Importancia del Parámetro			6,30	100,00

Tabla 11. Valores de los VIP utilizados para ponderar las variables ambientales en la determinación de la aptitud ambiental integral

1.4.2. Distribución de la Aptitud Ambiental Según Recursos

Desde el punto de vista geomorfológico, la mitad de la superficie considerada en el análisis (36.60 km²) presenta valores altos de aptitud (**Tabla 12**) para la instalación de un acueducto. Dicha superficie abarca un área continua hacia el norte y oeste de la región (**Mapa 1**), que es atravesada por áreas restrictivas que presentan una disposición lineal (tipo corredor), y que corresponden a bajos susceptibles de inundación. El resto del área considerada posee aptitudes no tolerables y restrictivas (aproximadamente el 26% y 15%, respectivamente) para la instalación de un acueducto.

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
0.9	36.60	44.09	36.60	44.09
0.3	21.53	25.94	58.13	70.03
0.0	12.36	14.89	70.49	84.92
Fuera del análisis	12.52	15.08	83.02	100.00

Tabla 12. Distribución de la aptitud ambiental según la geomorfología

Según las características geotécnicas de los suelos, la mayor parte de la superficie considerada (aproximadamente 54 km²) en el análisis presenta una aptitud tolerable para la instalación de un acueducto, tal como se observa en la **Tabla 13**. La zona de mayor aptitud (IAA = 0.8) se ubica hacia el norte y el oeste (**Mapa 2**) constituyendo una matriz continua con áreas localizadas de menor aptitud (IAA = 0.6). En una franja con dirección SO-NE se encuentra la zona de menor aptitud (IAA = 0.1), abarcando una superficie continua de 12.35 km². La misma presenta baja estabilidad de taludes y una susceptibilidad a la erosión de moderada a alta.

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
0.8	38.51	46.40	38.51	46.40
0.6	15.48	18.65	53.99	65.05
0.3	0.20	0.24	54.19	65.29
0.1	12.35	14.88	66.54	80.17
Fuera del análisis	16.46	19.83	83.00	100.00

Tabla 13. Distribución de la aptitud ambiental según las características geotécnicas de los suelos

La variable profundidad de la primera napa no constituye un factor restrictivo para la instalación de un acueducto. De hecho, el 100 % del área considerada en el análisis es apta (IAA = 1) o tiene valores de aptitud muy altos (IAA = 0.9) (**Tabla 14, Mapa 3**).

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
1	60.45	72.83	60.45	72.83
0.9	6.56	7.90	67.01	80.73
Fuera del análisis	15.99	19.27	83.00	100.00

Tabla 14. Distribución de la aptitud ambiental según la profundidad de la primera napa

Desde el punto de vista de las comunidades vegetales prácticamente el 90 % del área estudiada es apta para la instalación de un acueducto (**Tabla 15**). Dicha área constituye una matriz fragmentada en algunas partes por islas de superficie muy reducida y disposición lineal que presentan una aptitud no tolerable (IAA = 0.5) o restrictiva (IAA = 0) (**Mapa 4**). Las áreas restrictivas corresponden a vegetación nativa que, como puede observarse, se halla muy fragmentada y casi exclusivamente formando corredores en bordes de caminos y plantaciones.

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
1	74.45	89.68	74.45	89.68
0.5	1.84	2.21	76.29	91.89
0.3	0.57	0.68	76.86	92.57
0.1	3.92	4.72	80.78	97.29
0.0	2.25	2.71	83.02	100.00

Tabla 15. Distribución de la aptitud ambiental según la vegetación

Según la variable Áreas Protegidas, el 95.33 % del área estudiada es apta (IAA = 1) para la instalación de un acueducto (**Tabla 16**). Los 0.98 km² de aptitud restrictiva se localizan

bordeando al río (**Mapa 5**) y corresponden a áreas protegidas proyectadas. Existe además un área con interés para su conservación de 2.89 km² (IAA = 0.1) que se localiza hacia el centro y en el extremo oeste de la región.

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
1	79.14	95.33	79.14	95.33
0.1	2.89	3.49	82.03	98.82
0.0	0.98	1.18	83.02	100.00

Tabla 16. Distribución de la aptitud ambiental según las áreas naturales protegidas

Si se tiene en cuenta el uso del suelo (**Tabla 17**), se ve que la mayor parte del área (64.27 km²) presenta aptitudes no tolerables (IAA < 0.5) y restrictivas (IAA = 0) para la instalación de un acueducto. Esto se debe a fundamentalmente a las restricciones que impone el área urbana y a que prácticamente la mayor parte de la región presenta actividad agropecuaria. Las áreas aptas (IAA = 1) se hallan principalmente bordeando caminos (**Mapa 6**). Estas zonas son ideales para instalar el acueducto desde el punto de vista del uso del suelo debido a que, por un lado, ya se encuentran impactadas por ser áreas de servidumbre de caminos y, por otro, no requieren en general la expropiación de los terrenos.

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
1	18.45	22.23	18.45	22.23
0.6	0.30	0.36	18.75	22.59
0.5	1.84	2.21	20.59	24.80
0.4	17.89	21.55	38.48	46.35
0.3	35.30	42.52	73.78	88.87
0.0	9.24	11.13	83.02	100.00

Tabla 17. Distribución de la aptitud ambiental según el uso del suelo

Según la accesibilidad no hay áreas de aptitud no tolerable o restrictivas para la instalación del acueducto (**Tabla 18**), tal como se observa en el **Mapa 7** no hay sectores inaccesibles para la construcción y/o mantenimiento del mismo.

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
1	9.00	10.83	9.00	10.83
0.9	38.56	46.44	47.56	57.28
0.8	23.21	27.95	70.77	85.23
0.7	7.78	9.37	78.55	94.60
0.6	4.49	5.40	83.02	100.00

Tabla 18. Distribución de la aptitud ambiental según la accesibilidad

El 37.21 % del área considerada en el análisis (30.09 km²) presenta aptitudes altas (IAAs de 0.8 y 0.9) para la instalación de un acueducto según la distancia al borde del área urbana. Las áreas con IAA < 0.5 (no tolerables) ocupan un superficie continua en el centro del área estudiada (**Mapa 8**), por lo cual prácticamente cualquier traza potencial atravesaría áreas sensibles por su cercanía a la ciudad.

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
0.9	6.00	7.23	6.00	7.23
0.8	24.90	29.98	30.09	37.21
0.4	6.96	8.39	37.86	45.60
0.3	6.30	7.59	44.16	53.18
0.2	5.92	7.13	50.08	60.32
0.1	5.43	6.54	55.51	66.85
0.0	11.78	14.18	67.29	81.04
Fuera del análisis	15.74	18.96	83.02	100.00

Tabla 19. Distribución de la aptitud ambiental según la distancia al borde del área urbana

1.4.3. Distribución de la Aptitud Ambiental Global

Aproximadamente el 27 % del área situada al norte del río no es apta (IAA = 0) para la instalación de un acueducto (**Tabla 20, Mapa 9**). Dicha superficie corresponde mayoritariamente al ejido urbano.

Las áreas de aptitud tolerable (IAA > 0.5) ocupan prácticamente el 54 % del área. Sin embargo, la zona apta se halla fragmentada por zonas restrictivas que presentan una disposición lineal, tipo corredor.

Aptitud	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²) acumulada	Área (%) acumulada
0.9	2.11	2.54	2.11	2.54
0.8	25.39	30.59	27.50	33.13
0.7	12.95	15.60	40.45	48.73
0.6	4.19	5.04	44.64	53.77
0.5	0.28	0.34	44.92	54.11
0.4	0.03	0.04	44.95	54.15
0.0	22.35	26.91	67.30	81.06
Fuera del análisis	15.72	18.94	83.02	100.00

Tabla 20. Distribución de la aptitud ambiental global

1.5. IDENTIFICACIÓN, COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE TRAZAS ALTERNATIVAS SEGÚN LA APTITUD AMBIENTAL

Con el fin de aplicar los criterios de evaluación de aptitud ambiental, y a fines ilustrativos, se diseñaron cuatro trazas técnicas alternativas que se supone que tienen una relación económica comparable (**Mapa 9**), que poseen las características que se describen a continuación:

- 1). **Traza 1:** conecta los sitios de inicio y fin del acueducto atravesando la ciudad, siendo en la mayor parte de su recorrido paralela a 50 m de los caminos principales.
- 2). **Traza 2:** conecta los sitios de inicio y fin del acueducto en forma recta y es, por lo tanto, la traza que atraviesa la menor superficie absoluta de terreno.
- 3). **Traza 3:** conecta los sitios de inicio y fin del acueducto sin atravesar la ciudad, por la zona Norte. Su recorrido atraviesa, en general, campos agrícolas.
- 4). **Traza 4:** conecta los sitios de inicio y fin del acueducto sin atravesar la ciudad, su recorrido acompaña los caminos principales a 50 m de los mismos (es la traza más larga, por lo cual es la que atraviesa la mayor superficie absoluta de terreno).

La comparación y evaluación de la aptitud ambiental de las trazas se efectuó mediante la siguiente ecuación:

$$IAA_{traza} = \sum A_i \cdot P_i / A_{traza}$$

Siendo:

A_i = área (en km²) con aptitud ambiental i (0-máximo valor posible);

P_i = valor de la categoría de aptitud i (0-1);

A_{traza} = área total impactada por la traza (se consideró un área de influencia de 50 metros a cada lado de la traza).

Las áreas afectadas de las cuatro trazas son: 1.39 km² (Traza 1), 1.15 km² (Traza 2), 1.36 km² (Traza 3) y 1.42 km² (Traza 4).

El IAA_{traza} representa una valoración de aptitud ambiental promedio por unidad de superficie, y varía entre 0 (todas las unidades espaciales de la traza presentan aptitud nula) y 1 (todas las unidades espaciales presentan la máxima aptitud posible). De esta manera, cuanto mayor sea el valor del IAA_{traza} menor serán los impactos potenciales generados por dicha traza.

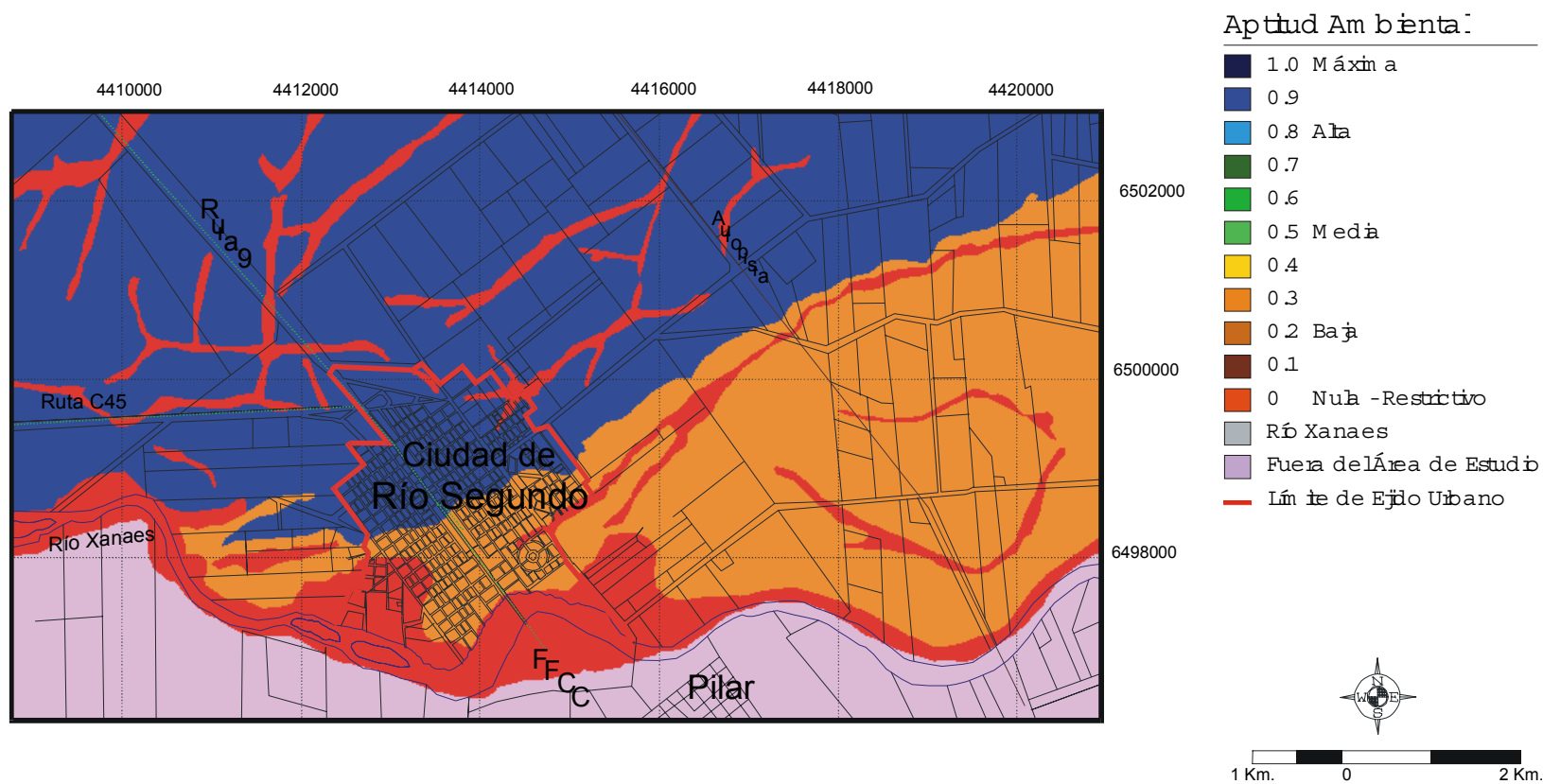
En la **Tabla 21** se observan los resultados de los IAA_{traza} para las cuatro trazas analizadas. A partir de estos resultados, y de la interpretación del **Mapa 9** puede concluirse que:

- Las Trazas 1 y 2 son las que generarían mayores impactos ambientales en el área estudiada ya que en gran parte de su recorrido atraviesan superficies restrictivas (aptitud = 0), particularmente en el área urbana.

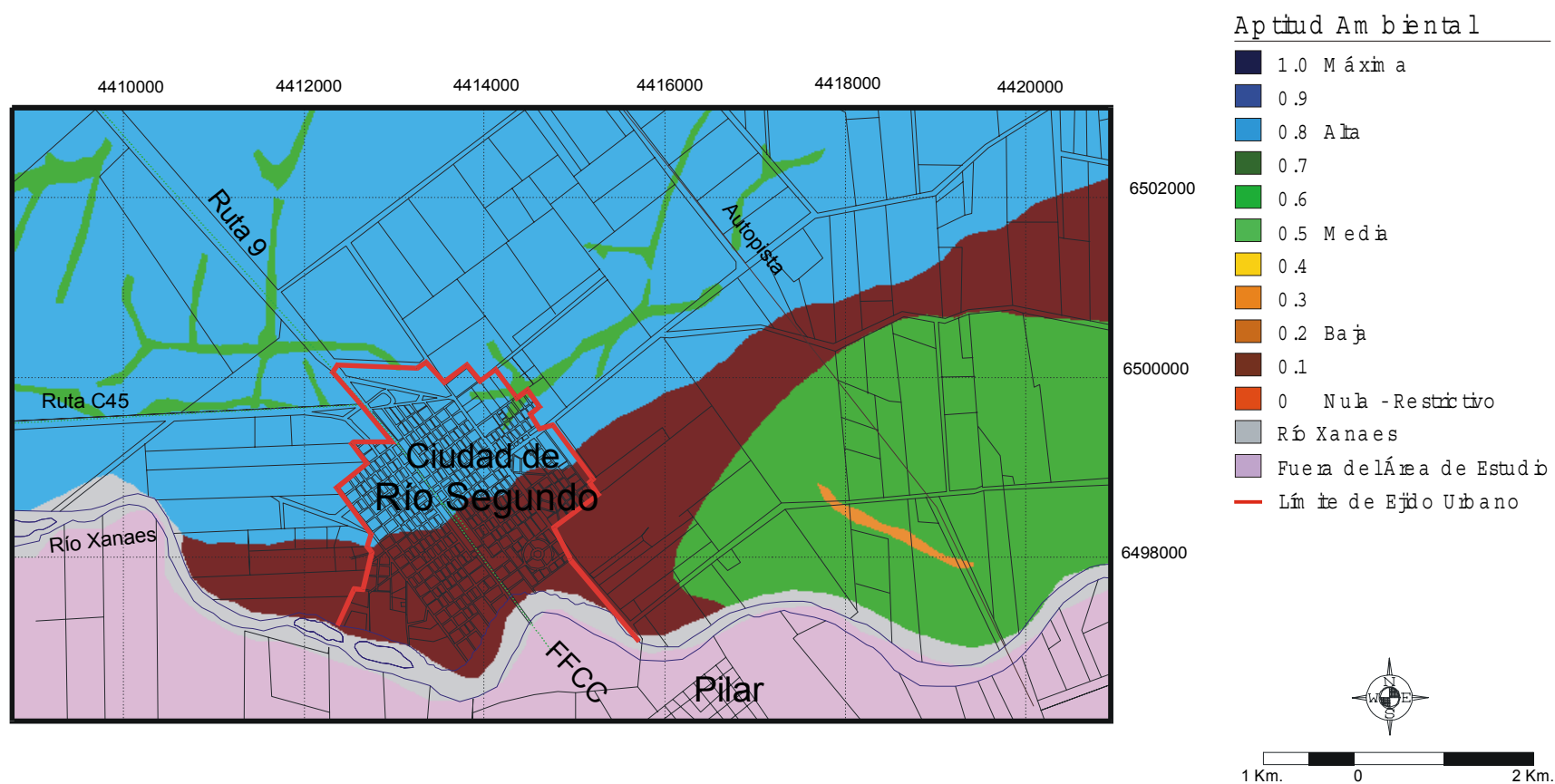
- La Traza 1 presenta un valor de aptitud más bajo que la Traza 2 debido a su mayor longitud dentro del área urbana.
- Las Trazas 3 y 4 constituyen las mejores alternativas desde el punto de vista ambiental para la instalación del acueducto. La Traza 4, a pesar de ser la más larga, es la que menos impactos potenciales generaría ya que posee el mayor valor de IAA.
- Si bien no se observa una gran diferencia en el valor de IAA entre ambas trazas, la Traza 4 constituiría la mejor opción ya que, a diferencia de la Traza 3, sigue el recorrido de los caminos principales y no atraviesa viviendas rurales.
- Cabe considerar que, además de las propuestas, existen otras trazas posibles que podrían atravesar zonas aún menos sensibles como puede observarse en el **Mapa 9**. Ello requeriría, sin embargo, análisis más detallados los cuales habría que llevar a cabo en un estudio real.

Aptitud	Traza 1	Traza 2	Traza 3	Traza 4
0.9	0.06 km ²	0.07 km ²	0.11 km ²	0.12 km ²
0.8	0.34 km ²	0.72 km ²	0.95 km ²	1.04 km ²
0.7	0.21 km ²	0.03 km ²	0.07 km ²	0.09 km ²
0.6	0.17 km ²	0.00 km ²	0.02 km ²	0.01 km ²
0.5	0.02 km ²	0.00 km ²	0.00 km ²	0.00 km ²
0.0	0.59 km ²	0.33 km ²	0.21 km ²	0.16 km ²
IAA traza	0.42	0.57	0.68	0.71

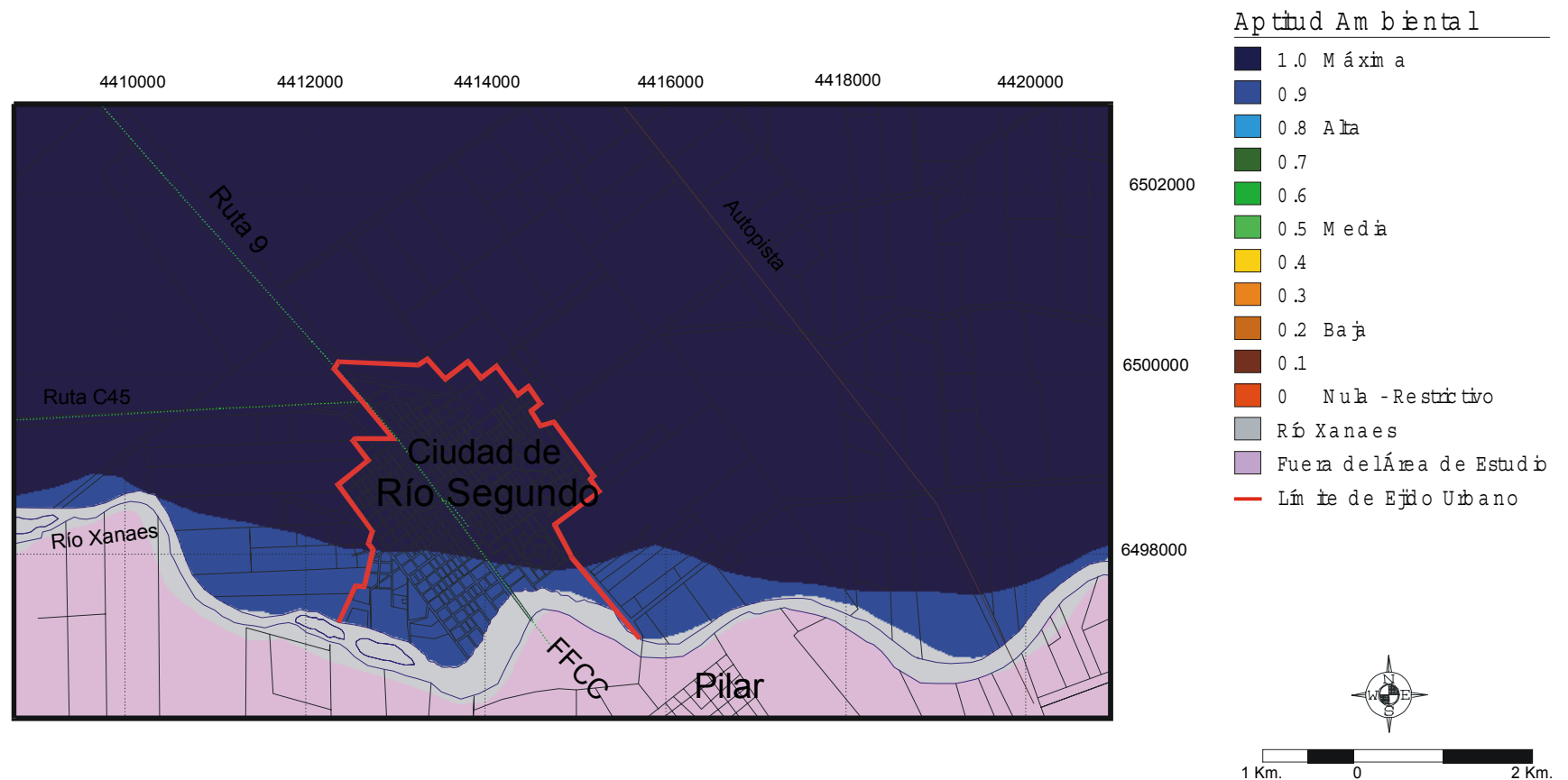
Tabla 21. Aptitud ambiental global para las trazas alternativas



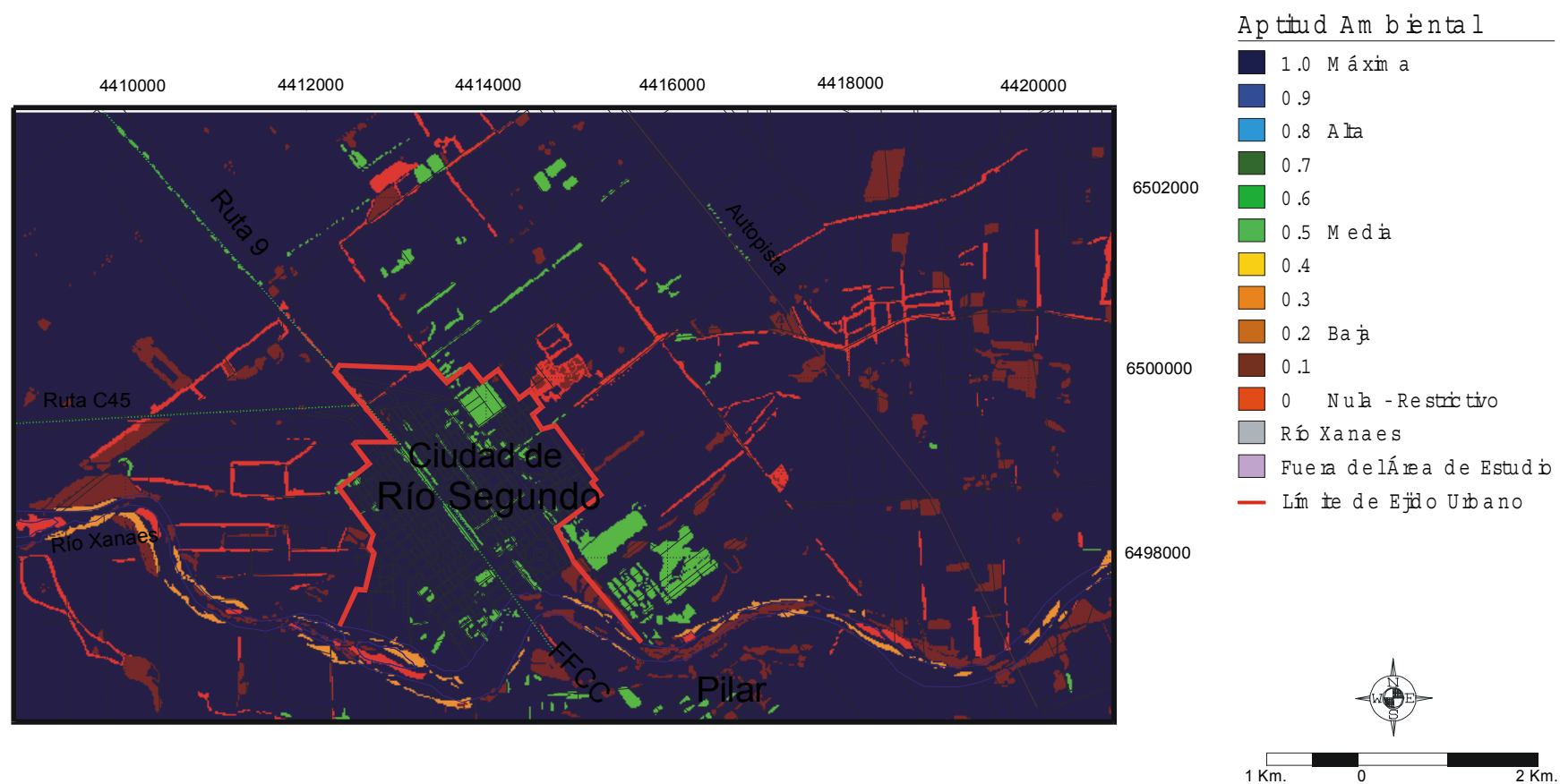
Mapa 1. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la geomorfología



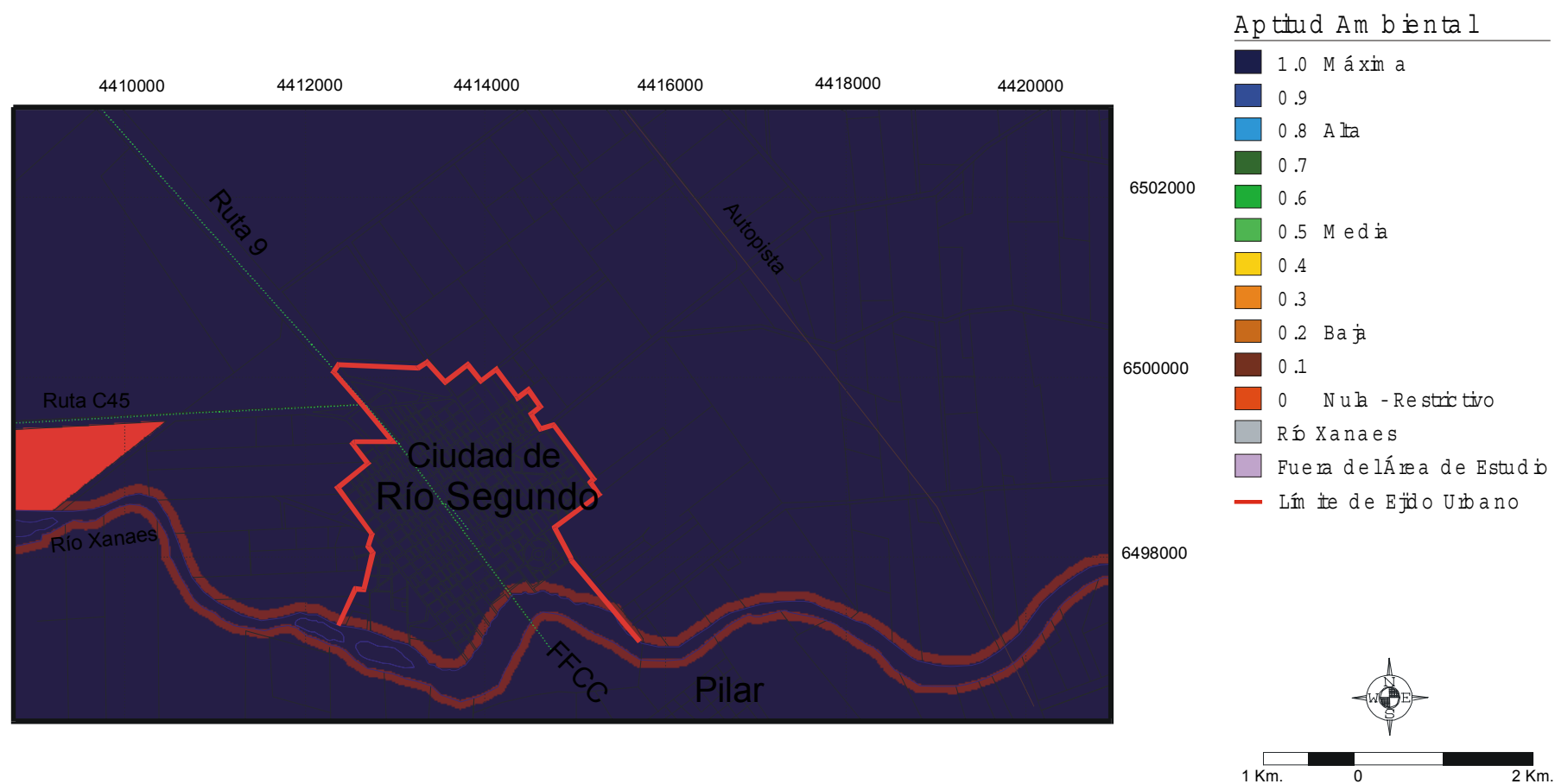
Mapa 2. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según las características geotécnicas de los suelos



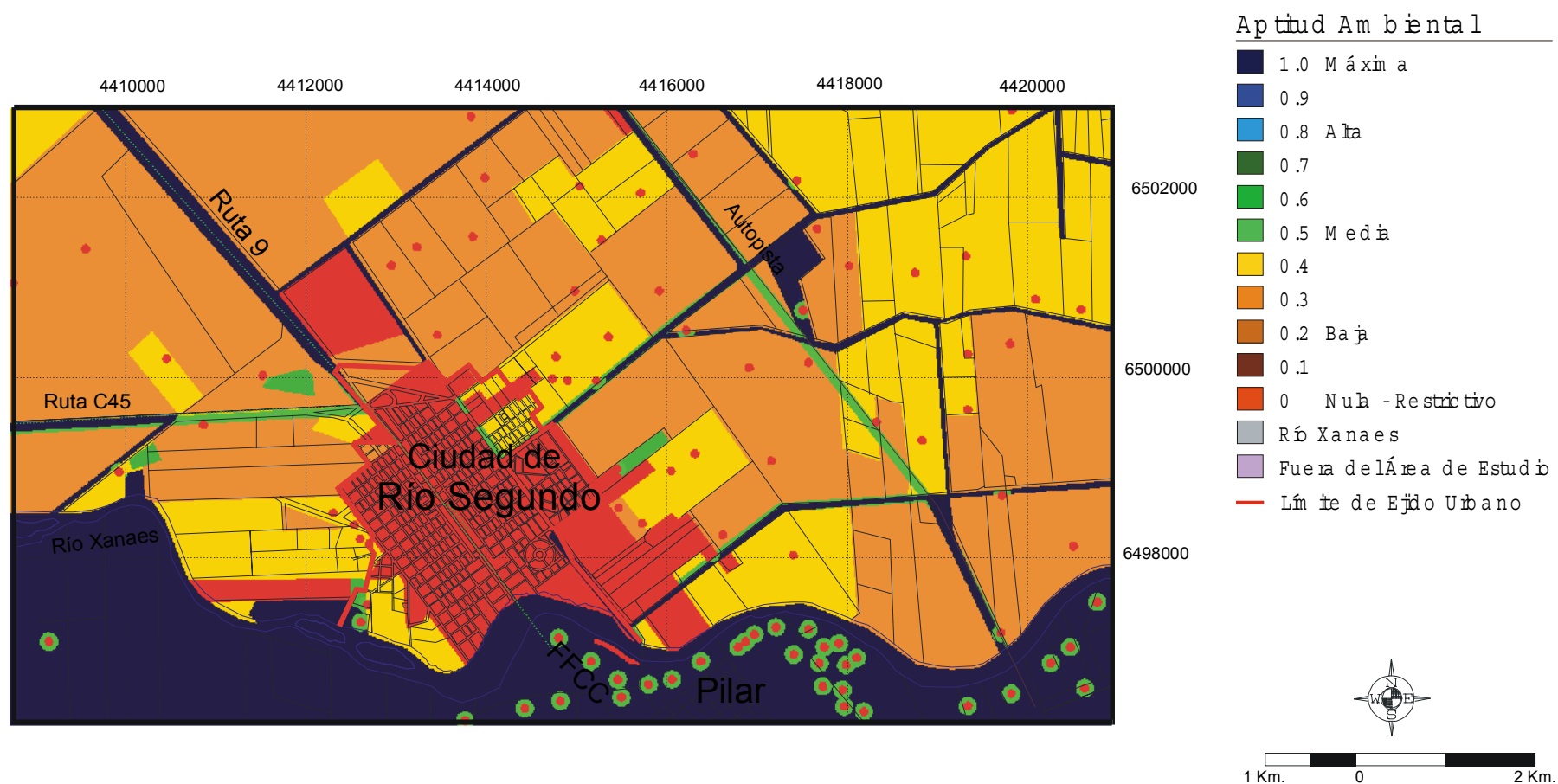
Mapa 3. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la profundidad de la primera napa



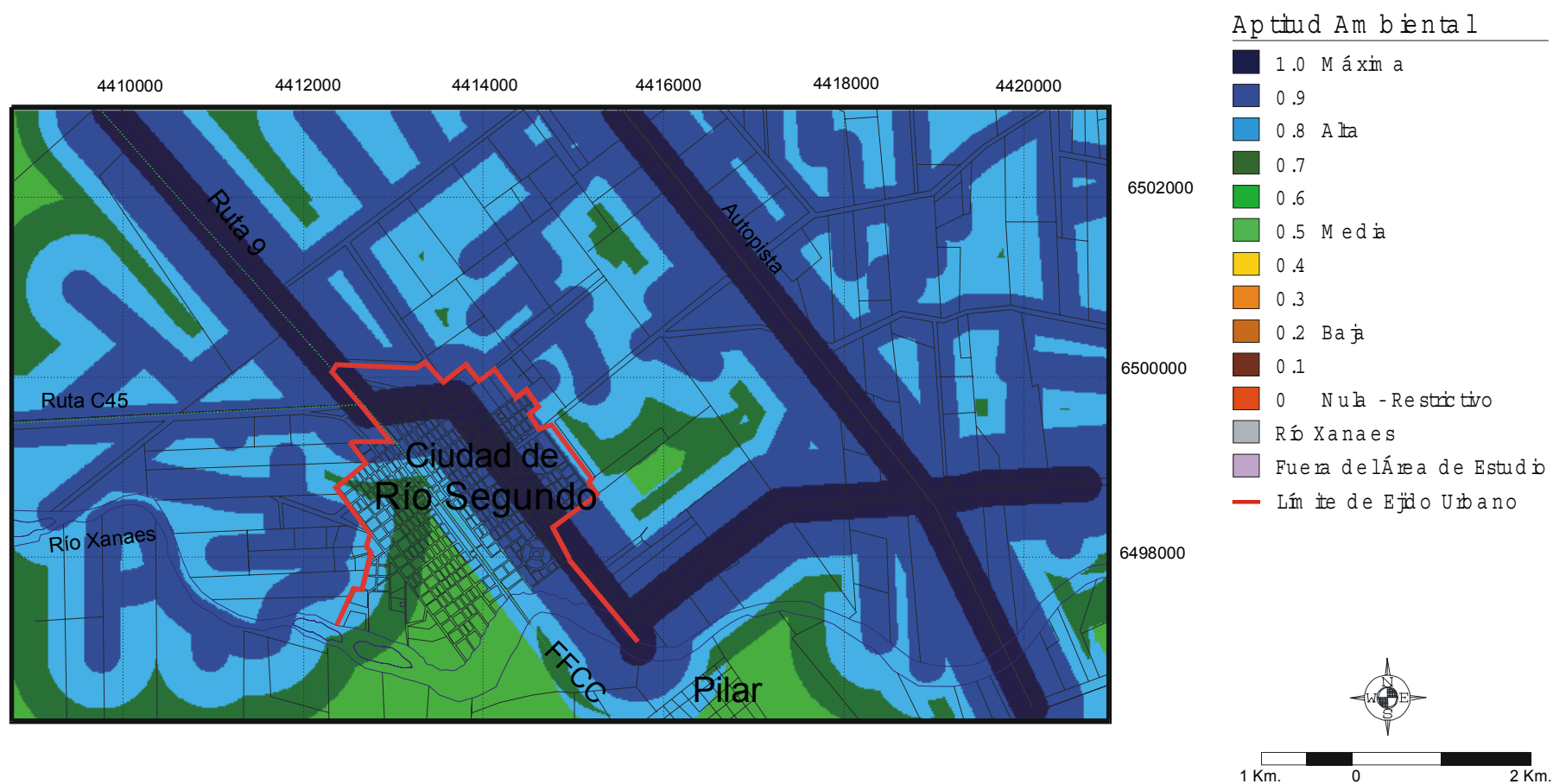
Mapa 4. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la vegetación



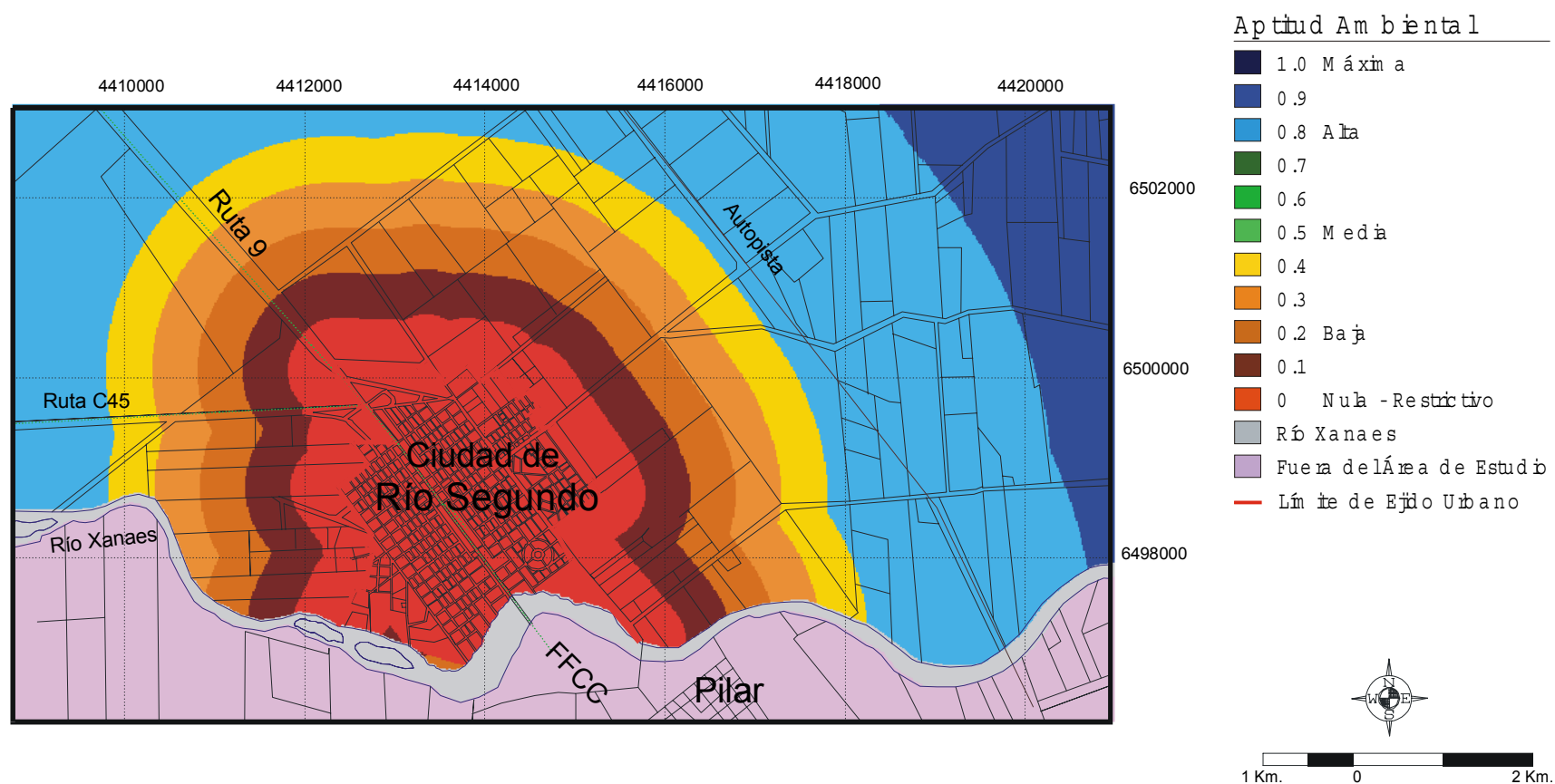
Mapa 5. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según las áreas naturales protegidas



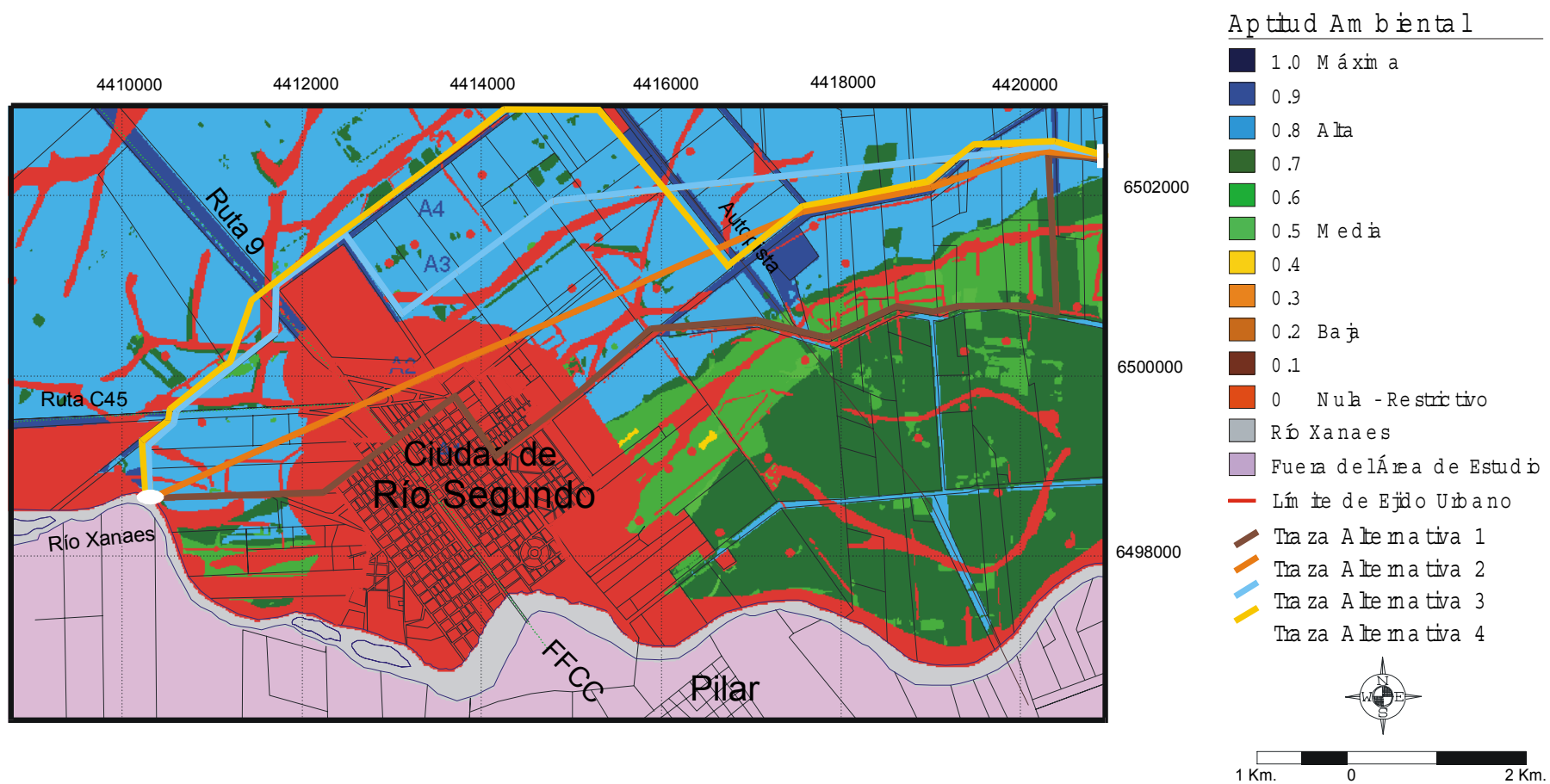
Mapa 6. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según el uso del suelo



Mapa 7. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la accesibilidad



Mapa 8. Valoración de la aptitud ambiental para la instalación de un acueducto según la distancia al borde del área urbana



Mapa 9. Mapa de aptitud ambiental integral para la instalación de un acueducto. ubicación de trazas alternativas