

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

**Zonificación de Servicios Ecosistémicos usando Técnicas de
Análisis Espacial Multicriterio:
Caso Municipio de Paipa, Colombia**

Paola Andrea Mateus Clavijo

Richard Resl, Ph.Dc., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Magister en Sistemas de Información Geográfica

Quito, septiembre de 2014

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Posgrados

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Zonificación de Servicios Ecosistémicos usando Técnicas de
Análisis Espacial Multicriterio: Caso Municipio de Paipa, Colombia**

Paola Andrea Mateus Clavijo

Richard Resl, Ph.Dc.

Director de Tesis

.....

Pablo Cabrera, Ph. Dc.

Miembro del Comité de Tesis

.....

Richard Resl, Ph.Dc.

**Director de la Maestría en Sistemas
de Información Geográfica**

.....

Stella de la Torre, Ph.D.

**Decana del Colegio de Ciencias
Biológicas y Ambientales**

.....

Víctor Viteri Breedy, Ph.D.

Decano del Colegio de Posgrados

.....

Quito, septiembre de 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

PAOLA ANDREA MATEUS CLAVIJO

C. C.: 20.577.138 (Cedula de Ciudadanía Colombiana)

Quito, septiembre de 2014

DEDICATORIA

A Sadhu Ram por su amor infinito;

*A mi abuela, quien me llenó de motivos para ser
una Ingeniera Forestal comprometida;*

A mi madre, porque gracias a su dedicación y entrega he llegado a ser quien soy;

A mi esposo, por su comprensión en esta etapa de mi vida;

*A mis hijos: Ángel, Juan Daniel y Samuel por darme cada día el impulso para cumplir
mis sueños.*

AGRADECIMIENTOS

Al equipo de UNIGIS en América Latina, especialmente a Jenny Correa por toda su colaboración a lo largo de mis estudios, a todos los tutores del programa de maestría por los excelentes contenidos de los módulos.

Al tutor Pablo Cabrera, por su paciencia y constante acompañamiento para que este trabajo de tesis culminara con éxito.

A mis amigos, compañeros y/o colegas, Biólogos, Ecólogos, Ingenieros ambientales y forestales por su valioso aporte en la calificación de los criterios e indicadores.

RESUMEN

En la planificación ambiental de los municipios colombianos se ha incorporado directa o indirectamente el concepto de servicios ecosistémicos, en los instrumentos de pago por servicios ambientales, la declaración de áreas protegidas regionales y municipales, la inclusión de la estructura ecológica principal en el ordenamiento territorial municipal, la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica, y la inclusión de amenazas y riesgos en los planes de ordenamiento territorial.

Este trabajo pretende contribuir en la identificación espacial de las zonas importantes por la capacidad de los ecosistemas de ofertar servicios a la sociedad, y contribuir a la acertada toma de decisiones relacionada con el interrogante ¿en dónde se pueden implementar de forma efectiva estos instrumentos de planificación municipal?

Para lograr este objetivo se construyó un Modelo de Análisis Espacial Multicriterio; para la evaluación y ponderación de los criterios e indicadores se siguió la metodología del *método de comparación de pares de saaty*, siguiendo la propuesta de agregación de *Juicios individuales (AIJ) para un grupo homogéneo de expertos*; la implementación y análisis de sensibilidad del modelo se realizó en el software ArcGis® con datos cartográficos del ordenamiento Territorial municipal.

Los resultados mostraron que el modelo desarrollado es consistente y que la zonificación obtenida es confiable; dejando las bases para un posterior trabajo que involucre un grupo no homogéneo de expertos.

ABSTRACT

In environmental planning of Colombian municipalities directly or indirectly has incorporated the concept of ecosystem services, in environmental planning instruments: payment for environmental services, the declaration of regional and local protected areas, the inclusion of the main ecological structure in the municipal territorial ordering, protection of strategic areas for water conservation, and including the management of the risk in plan of territorial ordering of the municipality

This paper aims to contribute to the spatial identification of important zones by the capacity of ecosystems to offer services to society, and contribute to successful decision making related to the question, ¿where can implement effective instruments municipal planning?

To meet this objective was developed a spatial multicriteria analysis model; for the evaluation and weighting of the criteria and indicators of methodology used was the method of paired comparison Saaty; following the proposal of aggregation of individual judgments (AIJ) to a homogeneous group of experts. The implementation and sensitivity analysis was performed in the ArcGis® software, considering the cartographic data of territorial ordering plan.

The results showed that the model developed is consistent and that zoning obtained is reliable; to pose the foundation for further work in a spatial model involving an inhomogeneous group of experts.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN..... | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| ÍNDICE DE MAPAS | 11 |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 12 |
| ÍNDICE DE ECUACIONES | 13 |
| 1 INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 15 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.2.1 <i>Objetivo General.....</i> | <i>15</i> |
| 1.2.2 <i>Objetivos específicos.....</i> | <i>15</i> |
| 1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN..... | 16 |
| 1.4 ANTECEDENTES | 16 |
| 1.5 ALCANCE | 19 |
| 2 REVISIÓN DE LITERATURA | 21 |
| 2.1 SERVICIOS AMBIENTALES Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS..... | 21 |
| 2.2 ANÁLISIS ESPACIAL MULTICRITERIO..... | 28 |
| 2.2.1 <i>Proceso analítico jerárquico.....</i> | <i>30</i> |
| 2.2.2 <i>Ponderación de factores.....</i> | <i>31</i> |
| 2.2.3 <i>Componentes del modelo.....</i> | <i>35</i> |
| 2.3 FASES DE APLICACIÓN | 38 |
| 3 METODOLOGÍA..... | 40 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. MUNICIPIO DE PAIPA..... | 40 |
| 3.1.1 <i>Localización y División político administrativa.....</i> | <i>40</i> |
| 3.1.2 <i>Geología, Geomorfología y clima</i> | <i>41</i> |
| 3.1.3 <i>Recursos Hídricos</i> | <i>42</i> |
| 3.1.4 <i>Fisiografía y Suelos</i> | <i>43</i> |
| 3.1.5 <i>Unidades fisiográficas.....</i> | <i>44</i> |
| 3.1.6 <i>Cobertura y Uso de la tierra.....</i> | <i>50</i> |
| 3.1.7 <i>Ecosistemas estratégicos y áreas protegidas</i> | <i>51</i> |
| 3.1.8 <i>Actividades económicas</i> | <i>52</i> |
| 3.2 FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA..... | 53 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.3 | CONSTRUCCIÓN DEL MODELO | 54 |
| 3.3.1 | <i>Definición de los Elementos del Modelo</i> | 54 |
| 3.3.2 | <i>Modelación de Criterios</i> | 55 |
| 3.4 | IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO | 58 |
| 3.4.1 | <i>Estandarización y Generación de los Mapas</i> | 58 |
| 3.4.2 | <i>Software GIS</i> | 59 |
| 3.5 | ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y AJUSTE DEL MODELO | 60 |
| 4 | RESULTADOS | 62 |
| 4.1 | CONSTRUCCIÓN DEL MODELO | 62 |
| 4.1.1 | <i>Definición de los Elementos del Modelo</i> | 62 |
| 4.1.2 | <i>Modelación de Criterios y Definición de la regla de decisión.....</i> | 66 |
| 4.2 | IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO | 73 |
| 4.2.1 | <i>Preparación de los datos</i> | 73 |
| 4.2.2 | <i>Estandarización y Generación de los Mapas de Indicadores.....</i> | 74 |
| 4.2.3 | <i>Integración de Indicadores para Generar los criterios.....</i> | 81 |
| 4.2.4 | <i>Integración de Criterios, Resultados del modelo.....</i> | 82 |
| 4.3 | ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y AJUSTE DEL MODELO | 83 |
| 5 | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 91 |
| 6 | CONCLUSIONES | 98 |
| 7 | BIBLIOGRAFÍA | 100 |
| 8 | ANEXOS..... | 105 |
| I. | ANEXO CONSTRUCCIÓN DEL MODELO | 105 |
| a. | <i>Anexo Ponderación por el método Sumatoria lineal ponderada</i> | 105 |
| b. | <i>Anexo Ponderaciones por pares de Saaty.....</i> | 106 |
| II. | ANEXO PREPARACIÓN DE LOS DATOS..... | 110 |
| a. | <i>Información cartográfica seleccionada para la elaboración de mapas temáticos por servicio ecosistémico</i> | 110 |
| III. | ANEXO 4 Mapas de los indicadores..... | 112 |
| a. | <i>Mapa del indicador A1.....</i> | 112 |
| b. | <i>Mapa del indicador A2.....</i> | 113 |
| c. | <i>Mapa del indicador A3.....</i> | 114 |
| d. | <i>Mapa del indicador B1.....</i> | 115 |
| e. | <i>Mapa del indicador B2.....</i> | 116 |

| | | |
|-----|---|-----|
| f. | Mapa del Parámetro 1 del indicador B3..... | 117 |
| g. | Mapa del Parámetro 2 del indicador B3..... | 118 |
| h. | Mapa del Indicador B3..... | 119 |
| i. | Mapa del Parámetro 1 del indicador C1..... | 120 |
| j. | Mapa del Parámetro 2 del indicador C1..... | 121 |
| k. | Mapa del Indicador C1 | 122 |
| l. | Mapa del Indicador C2 | 123 |
| m. | Mapa del Indicador C3 | 124 |
| IV. | ANEXO MAPA DE LOS CRITERIOS | 125 |
| a. | Mapa del Criterio A..... | 125 |
| b. | Mapa del Criterio B..... | 126 |
| c. | Mapa del Criterio C | 127 |
| V. | ANEXO PARÁMETROS EN LAS HERRAMIENTAS DE ARCGIS EN LA IMPLEMENTACIÓN..... | 128 |
| a. | Model Builder 1 Criterio A..... | 128 |
| b. | Weighted Overlay 1 Criterio A | 128 |
| c. | Criterio A Reclasificación por el método de único valor para los raster obtenidos por los dos métodos..... | 129 |
| d. | Model Builder 2 Criterio B..... | 131 |
| e. | Weighted Overlay 2 Criterio B | 132 |
| f. | Criterio B Reclasificación por el método de único valor para los raster obtenidos por los dos métodos..... | 132 |
| g. | Model Builder 3 Criterio C..... | 134 |
| h. | Weighted Overlay 3 Criterio C..... | 135 |
| i. | Reclasificación por el método de único valor para los raster de zonificación obtenidos por los métodos directo y de pares | 136 |
| j. | Model builder 4 del mapa de zonificación obtenido con el método de Tasación simple | 138 |
| k. | Mapa zonificación obtenido por el método de Tasación simple. | 138 |

ÍNDICE DE MAPAS

| | |
|--|----|
| Mapa 1 Localización Del Municipio De Paipa | 40 |
|--|----|

| | |
|---|-----------|
| <i>Mapa 2 Unidades Fisiograficas.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Mapa 3 Cambio En La Cobertura Y Uso De La Tierra</i> | <i>51</i> |
| <i>Mapa 4 Estandarización De Variables Del Indicador A2</i> | <i>75</i> |
| <i>Mapa 5 Estandarización De Variables Del Indicador B1</i> | <i>77</i> |
| <i>Mapa 6 Estandarización De Variables Del Indicador C3.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Mapa 7 Mapa De Zonificación Por El Método De Pares De Saaty. Agregación De Juicios Individuales.....</i> | <i>83</i> |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1 Indicadores Para Determinar El Uso De Los Servicios Ecosistémicos</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabla 2 Clasificación De Los Servicios Ecosistémicos.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabla 3 Matriz De Comparación Por Pares.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Tabla 4 Escala Fundamental De Comparación.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Tabla 5 Valores De La Consistencia Aleatoria</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabla 6 Unidades Geomorfológicas Del Municipio.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabla 7 Calificación De Los Expertos A Escala De Valores En La Escala De Saaty.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Tabla 8 Elementos Del Modelo</i> | <i>64</i> |
| <i>Tabla 9 Matriz Resultante De Agregación De Juicios Individuales De Criterios.</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabla 10 Comparación Por Pares De Indicadores Para El Criterio A.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabla 11 Comparación Por Pares De Indicadores Para El Criterio A, En Valores Decimales</i> | <i>70</i> |
| <i>Tabla 12 Matriz Resultante De Agregación De Juicios Individuales De Los Indicadores Del Criterio A.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Tabla 13 Comparación Por Pares De Indicadores Para El Criterio B.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 14 Comparación Por Pares De Indicadores Para El Criterio B, En Valores Decimales</i> | <i>71</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 15 Matriz Resultante De Agregación De Juicios Individuales De Los Indicadores Del Criterio B.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 16 Comparación Por Pares De Indicadores Para El Criterio C.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 17 Comparación Por Pares De Indicadores Para El Criterio C, En Valores Decimales.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 18 Matriz Resultante De Agregación De Juicios Individuales De Los Indicadores Del Criterio C.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla 19 Estandarización De Variables Del Indicador A1</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabla 20 Estandarización De Variables Del Indicador A3</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 21 Estandarización De Variables Del Indicador B2</i> | <i>77</i> |
| <i>Tabla 22 Estandarización De La Variable 1 Del Indicador B3</i> | <i>78</i> |
| <i>Tabla 23 Estandarización De La Variable 2 Del Indicador B3</i> | <i>78</i> |
| <i>Tabla 24 Estandarización De La Variable 1 Del Indicadorc1</i> | <i>80</i> |
| <i>Tabla 25 Estandarización De La Variable 2 Del Indicadorc1</i> | <i>80</i> |
| <i>Tabla 26 Estandarización De La Variable Del Indicador C2</i> | <i>80</i> |
| <i>Tabla 27 Valoración De Criterios Por Los Expertos Por El Método De Directo</i> | <i>84</i> |
| <i>Tabla 28 Juicios De Valor De Los Expertos Y Ponderado. Método De Tasación Simple</i> | <i>85</i> |
| <i>Tabla 29 Diferencia En El Juicio De Valor De Los Expertos.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Tabla 30 Comparación De Resultados Por Los Tres Métodos.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Tabla 31 Resultado De La Resta De Los Raster Obtenidos Por El Método De Pares Y El De Sumatoria Lineal Ponderada.....</i> | <i>89</i> |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|-----------|
| <i>Ecuación 1 Índice De Diferencia Media Por Pixel</i> | <i>61</i> |
| <i>Ecuación 2 Regla De Decisión De Zonas Importantes.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Ecuación 3 Criterio B.....</i> | <i>72</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Ecuación 4 Criterio C.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Ecuación 5 Regla De Decisión Para La Zonificación A Partir Del Método De Ponderación</i> | |
| <i>Directa</i> | <i>85</i> |
| <i>Ecuación 6 Ecuación Para La Zonificación A Partir Del Método De Tasación Simple Por</i> | |
| <i>Indicadores.</i> | <i>86</i> |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Paipa no tiene conocimiento espacial de los servicios ambientales que ofertan los ecosistemas de su jurisdicción o los que potencialmente podrían ofertar aquellos que han sido alterados; información fundamental para la implementación exitosa de instrumentos que incluyen de forma directa o indirecta el concepto de “servicios Ecosistémicos” en la planificación territorial de los municipios colombianos. Razón por la que se requiere contar con una herramienta técnica que permita al municipio de Paipa generar dicha información.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Zonificar los Servicios Ecosistémicos municipales – Caso Paipa, mediante Técnicas de Análisis Espacial Multicriterio

1.2.2 Objetivos específicos

1. Definir los objetivos, criterios e indicadores del sistema espacial de decisión multicriterio requeridos para la zonificación de los servicios Ecosistémicos
2. Construir el modelo de Análisis Espacial Multicriterio que permita zonificar el territorio municipal de acuerdo a las zonas homogéneas por su

importancia en los servicios que ofertan o podrían ofertar los ecosistemas de un municipio

3. Validar el modelo
4. Identificar zonas importantes por los servicios ecosistémicos que ofrecen o podrían ofertar los ecosistemas presentes en el municipio de Paipa ejecutando el modelo de Análisis Espacial

1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuáles son los objetivos, criterios e indicadores del sistema espacial de decisión multicriterio necesarios para realizar la zonificación de los servicios Ecosistémicos presentes en un municipio?
2. ¿Qué modelo espacial permite integrar los criterios e indicadores con el fin de determinar zonas homogéneas por su importancia en los servicios que ofertan o podrían ofertar los ecosistemas de un municipio?
3. ¿El modelo construido lo suficientemente confiable para generar zonificaciones de servicios Ecosistémicos en un municipio?
4. ¿Qué unidades importantes por sus servicios Ecosistémicos se identifican en el municipio de Paipa al ejecutar el modelo espacial de Análisis Espacial Multicriterio?

1.4 ANTECEDENTES

En las décadas '70 y '80 en el ámbito de la biología de la conservación se vuelve común el concepto de servicios Ecosistémicos (Ferrer *et al*, 2012) que describe la

estrecha relación y fuerte dependencia entre la sociedad y los ecosistemas, la sociedad como principal causa de la degradación de los procesos, bienes y servicios de los ecosistemas de los que a su vez depende para la satisfacción de las necesidades, subsistencia y calidad de vida de los pueblos (Balvanera *et al*, 2010).

En este contexto, se han generado a nivel mundial dos importantes marcos conceptuales; El Proyecto Global Land (GLP) del International Council for Science (ICSU) y la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA), convocado por las naciones unidas; siendo ambas iniciativas puntos de partida importantes para las naciones en el abordaje del estudio de los servicios Ecosistémicos y servicios ambientales, que reconocen la creciente y preocupante degradación ambiental así como la necesidad de realizar investigaciones para subsanar vacíos de conocimiento fundamentales para su manejo sostenible (Balvanera *et al*, 2010; EMA, 2005).

Colombia no es ajena a esta situación, en el 2008 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial¹, publicó la Estrategia Nacional de Pago por Servicios Ambientales, en donde se reconoce la necesidad de mejorar el conocimiento e información sobre los servicios ambientales que prestan los ecosistemas y que permita evaluar su estado y calidad, en el cual se propone elaborar una agenda de investigación conjunta entre las diferentes entidades del Sistema nacional ambiental.

En el país el tema de los servicios ecosistémicos se incluye de forma indirecta en el ordenamiento territorial con la ley 388 de 1997, que en el inciso 12 del artículo 8

¹ Hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

habla de *“Identificar y caracterizar los ecosistemas de importancia ambiental del municipio”* razón por la cual muchos municipios incluyeron en el diagnóstico de los planes de ordenamiento municipal el mapa de “ecosistemas estratégicos”, entendiéndose estos como las unidades ambientales funcionales de la naturaleza, de las que depende el aporte de bienes y servicios ambientales fundamentales para el bienestar y desarrollo de la sociedad (Márquez, 2002).

Posteriormente, el Plan Nacional de Desarrollo –PND 2010-2014, “Prosperidad para Todos” y el Decreto 3600 de 2007, establecen que en los planes de ordenamiento municipal se debe involucrar la estructura ecológica principal, y el artículo 111 de la ley 99 de 1993 que fue modificado por la ley 1450 de 2011 y reglamentado por el decreto 0953 del 2013, dispuso que los departamentos y municipios deben dedicar por lo menos el 1% de sus ingresos corrientes para la adquisición de predios estratégicos para acueductos municipales o para financiar esquemas por servicios ambientales.

El municipio de Paipa, en el año 2000 concluye la elaboración del plan de ordenamiento territorial aprobado por el concejo municipal mediante decreto 030, en donde entre otras disposiciones, se da la clasificación y categorización del suelo, categorías para el uso del suelo, delimitación de áreas de reserva, y delimitación de las zonas de amenazas naturales. En la fase de diagnóstico el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, contratado por el municipio, generó cartografía a escala 1:25.000 del sistema biofísico, relacionado con geología, geomorfología, minerales, recursos hídricos, clima, fisiografía, cobertura y uso de la tierra, ecosistemas

estratégicos, amenazas naturales y zonificación ecológica, así como mapas de infraestructura, división política, entre otros. Desde el año 2011 el municipio adelanta la fase de revisión y ajuste del plan de ordenamiento territorial por vencimiento de vigencia, de acuerdo al marco legal del ordenamiento territorial municipal de Colombia.

1.5 ALCANCE

Este trabajo está enfocado en la construcción de un modelo que permita identificar espacialmente áreas importantes en un municipio por la capacidad de los ecosistemas de ofertar servicios a la sociedad y evaluar el estado de estos servicios, teniendo en cuenta la estrecha relación sociedad – ecosistemas, comparando dos escenarios, uno hipotético, de ecosistemas sin alterar (oferta potencial) frente al escenario real (uso actual del territorio).

La metodología de la tesis se desarrolla en cuatro etapas: identificación de los criterios e indicadores, integración en un modelo de la realidad basado en análisis espacial multicriterio, validación, ajuste y finalmente su implementación para identificar los servicios ambientales de un municipio piloto. La información espacial incorporada tiene una escala no menor de 1:25.000, y una temporalidad no menor al año 2000. De igual forma, la calificación y asignación de pesos de las variables está dada por expertos temáticos.

Con la tesis se espera contribuir a la gestión ambiental territorial del municipio al brindar una herramienta técnica que permita conocer los servicios ambientales que

ofrecen o deberían ofrecer los ecosistemas de su jurisdicción, información indispensable para la implementación efectiva de los instrumentos de planificación municipal para la disminución de la presión sobre los ecosistemas y la degradación ambiental, como son el pago por servicios ambientales, la declaración de áreas protegidas regionales y municipales, la inclusión de la estructura ecológica principal en el ordenamiento territorial municipal, la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica, los planes de gestión municipal y la inclusión de amenazas y riesgos en los planes de ordenamiento territorial (Zúñiga, 2011).

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 SERVICIOS AMBIENTALES Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

El término “servicios Ecosistémicos” usado en un contexto científico busca explicar la relación entre las interacciones de los factores bióticos y abióticos al interior de los ecosistemas con su capacidad de brindar servicios para el bienestar humano (Balvanera y Colter, 2009), a diferencia del término “servicios ambientales”, más usado en el entorno político y económico, debido a la incursión del concepto en la economía ambiental en el marco de los “mercados ambientales” de la década de los 90´ (Bayon, 2007) y la más reciente estrategia de “pago por servicios ambientales, PSA” con una rápida acogida internacional, en América latina y en Colombia como una alternativa de desarrollo sostenible desde una perspectiva económica. En este trabajo se aborda el tema desde el concepto de “servicios Ecosistémicos”.

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio entre el 2001 y 2005 generó un marco conceptual acerca de las consecuencias de la transformación de los ecosistemas sobre el bienestar humano, definiendo los “servicios Ecosistémicos” como los beneficios que la gente obtiene de los estos, llegando a la conclusión que *“Todas las personas del mundo dependen por completo de los ecosistemas de la Tierra y de los servicios que éstos proporcionan”* (MEA, 2005, p. 3) y dando pautas científicas para su manejo sostenible, de tal forma que las condiciones para el bienestar humano no sean afectadas por causa de la degradación ambiental.

Los servicios Ecosistémicos fueron clasificados en la evaluación de ecosistemas del milenio en cuatro grandes grupos de acuerdo al tipo de beneficio recibido por la sociedad, en el grupo de “*Servicios de provisión*” se incluyeron los productos obtenidos de los ecosistemas, en “*Servicios de regulación*” aquellos que regulan los procesos de los ecosistemas; los beneficios no materiales se agruparon como “*Servicios culturales*” y finalmente como “*Servicios de Apoyo*” se clasificaron los procesos necesarios para la producción del resto (Alteso *et al*, 2010).

Servicios de provisión: Alimento, fibra, recursos genéticos, productos bioquímicos, medicinas naturales, productos farmacéuticos y agua.

Servicios de regulación: Regulación de la calidad del aire, Regulación del clima, Regulación del agua, Regulación de la erosión, Purificación del agua y tratamiento de aguas de desecho, Regulación de enfermedades, Regulación de plagas, Polinización y Regulación de los riesgos naturales.

Servicios culturales: Valores espirituales, religiosos, valores estéticos y recreación y ecoturismo.

Servicios de Apoyo o de soporte: ciclo de nutrientes, formación del suelo, producción primaria, producción de oxígeno y otros.

De acuerdo a esta clasificación el centro de monitoreo de la conservación mundial del PNUMA (UNEP_WCMC) describe cada uno de estos servicios y propone un indicador que permite evaluar su estado.

Tabla 1 indicadores para determinar el uso de los servicios Ecosistémicos

| Servicios | Proceso ecológico componente que proporciona la servicio (o influir en su disponibilidad) = funciones. | Indicador de estado (cómo gran parte del servicio es presente). | indicador de rendimiento (la cantidad puede ser usado / previsto en forma sostenible) |
|---|---|--|---|
| PROVISION | | | |
| 1.alimento | Presencia de plantas y animales comestibles | Totales o promedio en kg / ha | Productividad neta (en kcal / ha / año o en otra unidad) |
| 2. agua | La presencia de reservorios de agua | La cantidad total de agua (m3/ha) | Extracción sostenible del agua máxima (m3/ha/año) |
| 3. Fibra y combustible y otras materias primas | Presencia de especies o componentes abióticos con uso potencial para madera, combustible o crudo | La biomasa total (kg / ha) | Productividad neta (kg / ha / año) |
| 4. Materiales genéticos: los genes para la resistencia de las plantas a patógenos | La presencia de especies con material genético útil/(potencial) | Valor total 'banco genético' (por ejemplo, número de especies y subespecies) | Cosecha máxima sostenible |
| 5. Productos bioquímicos y recursos medicinales | Presencia de especies o componentes abióticos con productos químicos potencialmente útiles y / o de uso medicinal | La cantidad total de sustancias útiles que se pueden extraer (kg / ha) | Cosecha máxima sostenible (en unidad de masa / área / tiempo) |
| 6. Especies ornamentales y / o los recursos | Presencia de especies o recursos abióticos con uso ornamental | La biomasa total (kg / ha) | Cosecha máxima sostenible |
| REGULACIÓN | | | |
| 7. Regulación de la calidad del aire | Capacidad de los ecosistemas para capturar los aerosoles y los productos químicos de la atmósfera | Hoja índice de área NOx de fijación | cantidad de aerosoles o productos químicos y su efecto en la calidad del aire |

| | | | |
|--|--|--|--|
| 8. regulación del clima | Influencia de los ecosistemas sobre el clima local y global a través de la cubierta vegetal y procesos biológicos | Balance de gases de efecto invernadero (especialmente secuestro de carbono); | Cantidad de los gases de efecto invernadero, fijados y/o emitidos, efecto sobre los parámetros del clima |
| 9. Mitigación de desastres naturales | Función de los bosques en la amortiguación de los eventos extremos (por ejemplo, protección de daños por inundaciones) | Características de la cubierta vegetal y similares | La reducción de las inundaciones, peligro y prevenir daños a la infraestructura |
| 10. Regulación del agua papel de los bosques en el agua | la infiltración y la liberación gradual de agua | Capacidad de almacenamiento de agua en m ³ | Cantidad de retención de agua y la influencia en el régimen hidrológico |
| 11. Tratamiento de residuos | papel de la biota y los procesos abióticos en la eliminación o descomposición de materia orgánica, nutrientes y compuestos | Capacidad de retención del agua, suelos o de la superficie | Max cantidad de productos químicos que pueden ser reciclados o inmovilizados sobre una base sostenible |
| 12. Erosión papel de protección de la vegetación y biota en la retención del suelo | La desnitrificación (kg N / ha / año); | Inmovilización en plantas y el suelo | Cantidad de suelo retenido o sedimento capturado |
| 13. La formación del suelo y la regeneración | Papel en los procesos naturales de la formación del suelo y la regeneración. | | Monto de capa superficial de suelo regenerada por ha / año |
| 14. polinización | La abundancia y la eficacia de los polinizadores | Número y repercusiones de las especies polinizadoras | La dependencia de los cultivos de polinización natural |
| 15. regulación biológica | El control de las poblaciones de plagas a través de las relaciones tróficas | Número y repercusiones de las especies de control de plagas | Reducción de las enfermedades humanas, reducción de plagas ganaderas etc. |
| HABITAT O SOPORTE | | | |

| | | | |
|--|---|---|--|
| 16. hábitat | Importancia de los ecosistemas para proporcionar la cría, alimentación o descanso hábitat para especies | Número de especies e individuos transitorios (especialmente las que tienen valor comercial) | La dependencia de otros ecosistemas de este servicio de hábitat |
| 17. protección de la riqueza genética | Mantenimiento del equilibrio ecológico y de los procesos evolutivos | Biodiversidad natural (especialmente las especies endémicas); La integridad del hábitat | Valor ecológico (es decir, diferencia entre la biodiversidad actual y valor potencial) |
| CULTURA Y DISFRUTE | | | |
| 18. Estética: Apreciación de paisajes naturales | Calidad estética del paisaje. | Número / área de paisaje con importancia estética | Valor estético expresado. |
| 19. Comodidades: oportunidades para las actividades turísticas y recreativas | Paisaje - unidades con vida silvestre atractiva | Número / área del paisaje y la fauna características con valor recreativo establecido | Número máximo sostenible de las personas y las instalaciones |
| 20. La inspiración para la cultura, el arte y el diseño | Características del paisaje o las especies con valor inspirador de las artes humanas | Número / área de las particularidades topográficas o especies con valor inspirador | Número de uso real de los libros, pinturas. Ecosistemas usando como inspiración |
| 21. Patrimonio cultural e identidad: el sentido de lugar y pertenencia | Las características del paisaje Culturalmente importantes o especies | Numero / área de las particularidades topográficas culturalmente importantes o especies | número de personas usando los bosques como patrimonio e identidad cultural |
| 22. Inspiración espiritual y religiosa | Características del paisaje o las especies con valor espiritual y religioso | Presencia de las características del paisaje y especies con valor espiritual | Número de personas que se unen significado espiritual o religioso para los ecosistemas |
| 23. Educación y Ciencia oportunidades para la educación formal y no formal | Características de valor / interés educativo y científico especial | La presencia de características de valor / interés educativo y científico especial La cantidad de clases que visitan. | Número de estudios científicos |

Fuente: UNEP-WCMC, 2011

El IDEAM en el 2011 publicó una metodología para la definición de la estructura ecológica nacional con énfasis en servicios ecosistémicos a Escala 1:500.000, en donde se retoma esta clasificación de la evaluación de los ecosistemas del milenio.

Tabla 2 Clasificación de los servicios ecosistémicos

| Tipo de servicios | Categoría del servicio |
|--------------------------|---|
| Provisión | 1. Alimento |
| | 2. Agua |
| | 3. Materias primas |
| | 4. Recursos genéticos |
| | 5. Recursos medicinales |
| | 6. Recursos ornamentales |
| Regulación | 7. Regulación de la calidad del aire |
| | 8. Regulación climática (incluido el almacenamiento de carbono) |
| | 9. Moderación de eventos extremos |
| | 10. Regulación de corrientes de agua |
| | 11. Tratamiento de desechos |
| | 12. Prevención de la erosión |
| | 13. Mantenimiento de la fertilidad del suelo |
| | 14. Polinización |
| | 15. Control biológico |
| Hábitat / Soporte | 16. Mantenimiento de los ciclos de vida |
| | 17. Mantenimiento de la diversidad genética |
| Cultural | 18. Goce estético |
| | 19. Recreación y turismo |
| | 20. Inspiración para cultura, arte y diseño |
| | 21. Experiencia espiritual |

| | |
|--|--------------------------|
| | 22. Desarrollo cognitivo |
|--|--------------------------|

Fuente: UNEP-WCMC, 2011, citado por IDEAM, 2011

El IDEAM identificó siete de estos servicios Ecosistémicos como aporte institucional a la Estructura Ecológica del país para los cuales desarrollo una metodología para su identificación a nivel nacional basándose en sistemas de información geográfica y algebra de mapas. Se incluyó el servicio de provisión de agua y seis servicios de regulación:

- Provisión de agua
- Regulación de agua
- Moderación de movimientos en masa
- Moderación de eventos extremos por precipitaciones
- Moderación de eventos extremos por inundaciones
- Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea
- Almacenamiento de carbono en el suelo

Una vez identificados los servicios a incluir en la propuesta metodológica selecciona los insumos cartográficos e insumos documentales asociados a los mapas nacionales y regionales con información confiable de los servicios Ecosistémicos (IDEAM, 2011)

Tanto para la identificación espacial, la evaluación del estado y valoración de cada servicio ecosistémico, propone los siguientes criterios:

1. **Categorías del servicio ecosistémico** En este criterio el IDEAM cuantifica o cualifica el valor original del servicio. (Alta, media y baja)
2. **Estado y calificación del servicio ecosistémicos** teniendo en cuenta el mapa nacional de ecosistemas se califica el estado actual de estos servicios en un rango de 0 a 1, calificando en 0 aquel ecosistema que por su grado de transformación no presta dicho servicio

Por ejemplo, para el servicio provisión de agua, se describe la variable de acuerdo al rendimiento hídrico, unas categorías de bajo, medio y alto, de acuerdo a los rangos de litros/segundo/ Km² para ecosistemas naturales, seminaturales y transformados, asignando a cada caso un valor entre 0 y 1. El estudio concluye con una hoja metodológica para el mapeo de cada servicio ecosistémico, y un mapa resultante.

2.2 ANÁLISIS ESPACIAL MULTICRITERIO

El análisis de decisión multicriterio permite a partir de un conjunto de alternativas seleccionar la más óptima, teniendo en cuenta diversos criterios, e incorporar variables espaciales a partir de los sistemas de información Geográfica (Taboada y Cotos, 2005).

La evaluación multicriterio permite involucrar varios criterios, identificar la importancia relativa de cada uno de ellos y evaluar una serie de alternativas posibles para resolver el problema planteado del que se desea tomar una decisión. (Pacheco y Contreras, 2008)

De acuerdo a Gómez y Barredo (2006) los elementos pertenecientes a este método son:

- **Objetivos**

Los objetivos es un aspecto básico de la EMC, siendo estos la estructuración de la regla de decisión o el tipo de regla de decisión a utilizar, es decir a partir del objetivo se elige y estructura la regla de decisión acorde para resolver el problema.

En caso de considerarse más de un objetivo (múltiples objetivos) se considera un estudio multiobjetivo.

- **Alternativas**

Las alternativas están definidas por una serie de criterios o factores que se han de tener en cuenta en la evaluación; a nivel territorial se entienden como alternativas aquellas unidades incluidas en la evaluación. En la EMC se entiende como los objetos ya sean en raster o en vector (celdas, líneas puntos o polígonos) a evaluar.

- **Criterios**

Los criterios son el punto de referencia para realizar la evaluación, estos deben ser medidos y evaluados, aspectos de los que depende el éxito o fracaso de la evaluación.

Existen dos tipos de criterios, los factores y limitantes; siendo los factores aquellos criterios que favorecen una alternativa sobre otras, y el criterio limitante como su

nombre lo indica restringe la disponibilidad de las alternativas en cuanto a la actividad evaluada, actuando como un criterio excluyente, de esta forma genera una capa binaria, por ejemplo 0 y 1. Según Eastman (citado por Gómez y Barredo, 2006) el criterio de tipo de limitante puede ser una característica que se debe poseer.

Una de las características de la Evacuación multicriterio que involucra el componente espacial es que para cada variable que representa cada uno de los criterios se genera una capa temática de datos espaciales, que luego pueden ser combinadas teniendo en cuenta la regla de decisión en busca de la evaluación.

2.2.1 Proceso analítico jerárquico

El proceso de análisis Jerárquico, conocido también como método AHP, por sus siglas en inglés (Analytic Hierarchy Process) fue propuesto por Thomas I. Satty en 1980 con el fin de apoyar la toma de decisiones en la solución de problemas complejos con múltiples criterios. (Lamazares y Berumen, 2011)

Este método se basa en una comprensión jerárquica del problema en donde el vértice superior se ubica el problema u objetivo general a alcanzar, y en las bases se localizan las posibles alternativas que se quieren evaluar, y en la parte intermedia se ubican los criterios localizados también en jerarquías. (García, 2009) también cuando se incluyen subcriterios operativos se les da el nombre de modelo jerárquico multinivel (Lamazares y Berumen, 2011)

Este método sigue las siguientes etapas metodológicas (García, 2009):

- 1.) Modelización. En esta etapa se construye el modelo jerárquico en donde se busca representar la totalidad de componentes involucrados en la decisión
- 2.) Valorización. Se incorporan los juicios de los actores involucrados en matrices cuadradas y se comparan los elementos de acuerdo a los valores obtenidos.
- 3.) Priorización y síntesis.

Una ventaja que ofrece este método es la posibilidad de mostrar esta estructura de forma gráfica mediante el esquema del modelo jerárquico en donde se desglosa el problema y la solución de este en sus diferentes partes. Objetivo, criterios, subcriterios y alternativas. Siendo los criterios y subcriterios los puntos de vista o preferencias que se consideran importantes para alcanzar el objetivo o solucionar un problema. (Lamazares y Berumen, 2011)

2.2.2 Ponderación de factores

a. Método de comparación por pares de Saaty

Es necesario expresar de forma cuantitativa la importancia que tienen los criterios frente al problema u objetivo a evaluar, entre ellos el método directo, en donde se asumen los valores asignados por los expertos y el método por pares de Saaty. (Gómez y Barredo, 2006)

Este método se basa en la construcción de una matriz cuadrada en donde el número de filas y columnas se define por el número de factores a ponderar, estableciendo una comparación entre pares de factores, y la importancia de cada uno sobre los demás (Gómez y Barredo, 2006)

- Construcción de una matriz de comparación por pares de factores, en cuyas celdas se asignan un juicio de valor, representando la importancia relativa de cada factor.

Tabla 3 Matriz de comparación por pares

| | | | |
|---|-----|-----|-----|
| | A | B | C |
| A | A/A | A/B | A/C |
| B | B/A | B/B | B/C |
| C | C/A | C/B | C/C |

Fuente: (Aznar & Guijarro, 2012)

La escala de medida es de tipo continuo en un valor comprendido entre 1 hasta 9 y permite asignar un juicio de valor al comparar cada par de factores:

Tabla 4 Escala fundamental de comparación

| Valor | Definición | Explicación |
|---------|------------------------|--|
| 1 | Igual importancia | La importancia de A y B son iguales |
| 3 | Importancia moderada | A es ligeramente más importante frente a B |
| 5 | Importancia grande | A es Fuertemente más importante frente a B |
| 7 | Importancia muy grande | A es mucho más importante frente a B |
| 9 | Importancia extrema | A es totalmente ms importante frente a B |
| 2 4 6 8 | | Valores intermedios |
| | Otros valores | 1/5 1 / 2 como valores intermedios. |

Fuente: (Aznar & Guijarro, 2012)

Una vez ponderados los criterios por expertos se construye el modelo jerárquico que permite tener un panorama completo del modelo los criterios e indicadores seleccionados, las valoraciones y las alternativas. Las etapas son las siguientes (Gómez y Barredo, 2006):

- Estructuración de los factores de una forma jerárquica. Objetivo general, criterios jerarquizados y alternativas (García, 2009)
- Identificación de la importancia relativa de los elementos a partir del método de comparación de pares.
- Obtención de los pesos compuestos o globales a partir de la agregación de los pesos en cada jerarquía, calculando una puntuación total R_i para cada alternativa (i) de acuerdo a (Gómez y Barredo, 2006):

$$R_i = \sum_k w_k r_{ik}$$

en donde:

W_k : vector de prioridades en pesos

K elementos de la estructura jerárquica de criterios

La suma w_k es 1

R_{ik} : vector de prioridades

De esta forma cada alternativa obtiene un R, que permite ordenarlas, para conocer la más adecuada de acuerdo al R obtenido (Gómez y Barredo, 2006)

b. Agregación de Juicios individuales (AIJ)

La agregación de prioridades individuales se realiza para un grupo de expertos que al tener una afinidad profesional, laboral, cultural, entre otras, realizan valoraciones

muy homogéneas. Consiste en realizar inicialmente la valoración por pares de las calificaciones de cada experto, hasta obtener los vectores propios de las matrices, y finalmente agregar estos vectores calculando la media geométrica (Aznar & Guijarro, 2012)

Se debe calcular inicialmente la consistencia de la matriz, para lo cual se tiene:

$CR = CI / \text{Consistencia aleatoria}$

Siendo CR: Ratio de la consistencia

CI = índice de consistencia

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

El índice de consistencia se calcula para cada matriz a partir de:

La consistencia aleatoria toma valores fijos dependiendo el tamaño de la matriz:

Tabla 5 Valores de la consistencia aleatoria

| Tamaño de la matriz | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Consistencia aleatoria | 0,0 | 0,0 | 0,52 | 0,89 | 1,11 | 1,25 | 1,35 | 1,40 | 1,45 | 1,49 |

Fuente: Aznar & Guijarro, 2012

Los valores máximos que puede tomar el ratio de consistencia están dados en función del tamaño de la matriz, siendo, para una matriz de 3x3 del 5%, 4x4 de hasta el 9% y de 5x5 o mayor hasta del 10%. (Aznar & Guijarro, 2012)

c. Otros métodos

- *El método de Tasación simple*, consisten en la asignación por parte de los expertos a partir de la ponderación de cada criterio, hasta lograr el agregado de 100 valores. (Gómez y Barredo, 2006)

- *Escala de 7 puntos.* Se asigna un valor de importancia de 1 a 7 y luego se normaliza en la escala deseada por el planificador (Gómez y Barredo, 2006)
- *Ordenación simple:* los criterios se califican en el orden de importancia en un rango de valores, luego estos valores se normalizan (Gómez y Barredo, 2006)
- *Sumatoria lineal ponderada:* Este método evalúa las alternativas de una forma sencilla, sumando los resultados de las multiplicaciones de del valor del criterio por su peso.

$$r_i = \sum_{j=1}^n W_j V_{ij} \text{ en donde}$$

r_i nivel de adecuación de la alternativa
 W_j es el peso del criterio j
 V_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j

Fuente: Gómez y Barredo, 2006

2.2.3 Componentes del modelo

a. La regla de decisión

La regla de decisión permite seleccionar entre varias alternativas, siendo el procedimiento a través del cual se obtiene una evaluación dada y facilita al tomador de la decisión seleccionar u ordenar una o varias alternativas (Malczewski, 1999):

La regla de decisión sigue unos procedimientos matemáticos y/o estadísticos para integrar los criterios mediante dos tipos de procedimientos, la función de selección en donde la comparación de las alternativas se basa en una optimización matemática de las alternativas, siendo necesario que cada alternativa sea evaluada teóricamente.

El segundo procedimiento, la función heurística es más fácil de comprender e implementar ya que permite seleccionar una o algunas alternativas, de esta forma el procedimiento de función de selección “clasifica” y la función heurística “selecciona”.

La construcción de la regla de decisión se realiza en dos momentos, uno relacionado con la valoración de los criterios individualmente, y el segundo la integración de estos.

b. La evaluación

Para Gómez y Barredo (2006) la evaluación consiste en el proceso de aplicar la regla de decisión previamente estructurada, generando el modelo de decisión.

La evaluación se realiza desglosando el objetivo de la evaluación en varios objetivos específicos representados por uno o varios criterios que indican la forma en que se aplica la regla de decisión. Estos criterios se estructuran en capas criterio que son evaluados mediante la regla de decisión; es necesario entonces que al estructurar la regla se especifiquen los procedimientos para llevar a cabo la evaluación.

c. Matrices

La organización más adecuada para representar los criterios y alternativas es una matriz, en donde los criterios se pueden representar en la Columna y las alternativas en la fila principal, de esta forma, los valores internos, las puntuaciones de criterios, muestran el valor que toma cada alternativa para cada criterio (matriz de evaluación) (Gómez y Barredo, 2006).

En esta matriz de evaluación se identifica el punto ideal, vector formado por los valores más altos de cada criterio, que permite evaluar para cada alternativa la distancia hasta el óptimo deseado.

Existen situaciones en que los criterios tienen diferente importancia en la solución del problema o en la toma de la decisión, por lo que es necesario representar en una matriz de ponderación la importancia relativa, ya sea por peso o ponderación; si se habla de peso del criterio este se está expresando de forma cuantitativa, por el contrario si se expresa en forma cualitativa, se entiende como jerarquía (Voogd, citado por Gómez y Barredo, 2006).

Otro aspecto a tener en cuenta es la importancia de una mirada interdisciplinar en la calificación de los pesos de los criterios, así como de la calificación para cada alternativa, citada por diversos autores (Gómez y Barredo, 2006; Domínguez *et al*, 2004; Massam, 1991).

d. Análisis de sensibilidad

Comprende la última etapa de la EMC, se realiza con el fin de validar el modelo y conocer su grado de sensibilidad y por tanto su estabilidad, y así conocer el grado de confiabilidad de los resultados.

El análisis de sensibilidad es muy útil cuando los resultados del modelo son difíciles de demostrar, y puede indicarnos que parte del modelo se deben mejorar o que aspectos están influyendo en un mayor grado en la variación de los resultados (Orán *et al*, 2011)

En la literatura se identifican 3 tipos de análisis de sensibilidad teniendo en cuenta la etapa del modelo en la cual se ejecute el análisis de la incidencia de (Orán *et al*, 2011):

- Cambio en la modelación de los factores.
- Variación de los pesos de los factores. Este es el método que más se ha utilizado en análisis espacial multicriterio, ya que tiene en cuenta la subjetividad relacionada con la asignación de juicios por parte de los expertos.
- Variación en los métodos de EMC

2.3 FASES DE APLICACIÓN

La evaluación espacial multicriterio se desarrolla en 4 pasos (Malczewski, 1999):

1. Definición del problema
2. Definición de elementos relacionados con la decisión; Objetivos, criterios y alternativas
3. Definición de pesos para los criterios de evaluación.
4. Definición de una apropiada regla de decisión.

Una variación de estas etapas tiene en cuenta 5 pasos, iniciando con la estructuración, en donde se identifican los factores y limitantes de acuerdo con los objetivos, el segundo paso es la estandarización de los criterios en unidades comparables entre sí, luego se realiza la ponderación que da el peso o importancia de cada factor en el proceso analítico; el cuarto, momento es la obtención de alternativas en donde se identifican las áreas que muestran las mejores condiciones

y finalmente el análisis de sensibilidad en donde se conoce el grado de confianza que tienen los resultados. (Sendra *et al*, 2008)

En este mismo artículo los autores plantean que existen 4 formas de introducir modelos dentro de los SIG, una forma tradicional, en donde se agrega información y se realizan superposiciones cartográficas, ocasionando grandes inversiones de tiempo, otra forma más eficiente es usando los módulos establecidos en los tres software evaluados por el estudio: *Decisión Wizard* en Idrisi, *Spatial Multi-Criteria Evaluation* en Ilwis y *Wighted overlay* en ArcGIS, la cuarta forma es mediante las rutinas automatizadas *Macro Modeler* en Idrisi y *ModelBuilder* en ArcGis, o mediante Scripts o macros que permiten generar nuevos módulos (Sendra *et al*, 2008).

Teniendo en cuenta los tres software analizados, la investigación concluye que existen elementos suficientes para la implementación de evaluación espacial multicriterio, pero que el desarrollo de los SIG tiene la tendencia hacia operaciones más complejas en el proceso de toma de decisiones.

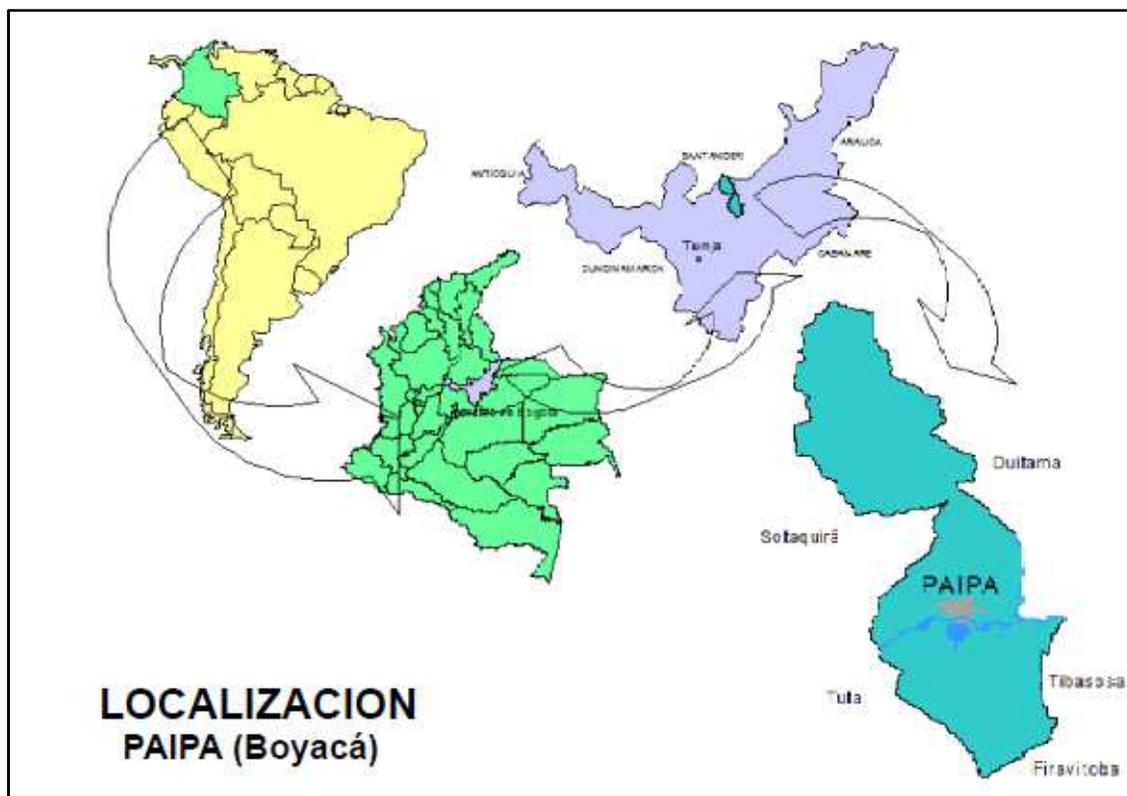
3 METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. MUNICIPIO DE PAIPA

3.1.1 Localización y División político administrativa

El municipio de Paipa ocupa un área de 20.592 ha (IGAC,2000), está localizado en la provincia de Tundama, en el corredor industrial del departamento de Boyacá, aproximadamente a 184 Km de la ciudad de Bogotá capital de la Republica de Colombia y 40 Km de la Ciudad de Tunja, capital departamental.

Mapa 1 Localización del Municipio de Paipa



Fuente: Plan Básico de Ordenamiento Territorial, PBOT. IGAC, 2000

Limita al norte con el Departamento de Santander; al Oriente con los municipios Tibasosa y Duitama; al sur con el municipio de Firavitoba y al occidente con los municipios de Sotaquirá y Tuta. El sector rural está conformado por 38 veredas y el corregimiento de Palermo, y el casco urbano por 17 barrios. (IGAC, 2000).

3.1.2 Geología, Geomorfología y clima

El municipio se encuentra ubicado sobre la cordillera oriental de Colombia, formada por rocas sedimentarias de origen marino y continental, presentando intrusión de fragmentos ígneos. (IGAC, UPTC, 2005)

Uno de los renglones más importantes en su economía es la explotación de recursos minerales como el carbón, puzolana, arena, arcillas, y materiales mixtos, en general aprovechados en minería a pequeña escala y de subsistencia. (IGAC, 2000)

Geomorfológicamente se encuentra localizado sobre una cadena de montañas de estructura plegada sobre la cordillera oriental limitada en ambos flancos por fallas de tipo inverso; que han dado origen a 4 unidades genéticas de relieve que se describen en la siguiente tabla.

Tabla 6 Unidades Geomorfológicas del municipio

| UNIDAD | DESCRIPCIÓN DEL ORIGEN |
|--|---|
| unidad de origen erosional estructural | Esta unidad tiene su origen en el plegamiento y fallamiento de rocas sedimentarias del jurásico, jurásico, cretáceo y terciario, con una posterior meteorización y denudación, fluvio- erosional y gravitacional de las aleritas resultantes. De esta forma se esculpieron densas y profundas redes de drenaje. |

| | |
|---|---|
| unidad de origen fluvio erosional | Corresponde a todos los paisajes de origen de denudación fluvio erosional. |
| unidades de origen agradacional de piedemonte | Unidad formada por procesos de sedimentación coluvial y aluvial, generando unidades dispersas de piedemonte pequeñas. |
| unidades de origen agradacional de valle | Esta unidad corresponde a los paisajes más bajos y planos. |

Fuente: IGAC, 2000

Altitudinalmente el territorio varía entre los 2.200 msnm y 3.500 msnm, en los pisos térmicos frío, muy frío o subparamuno, y en provincias de humedad que varía entre húmeda a seca. (IGAC, 2000)

3.1.3 Recursos Hídricos

Teniendo en cuenta el diagnóstico del plan básico de ordenamiento territorial (PBOT), se establece que el municipio hace parte de tres importantes cuencas, la cuenca del río Chicamocha, Río Palermo, y río Tota, (IGAC, 2000), y a partir de la información contenida en el Sistema de información geográfico de Corpoboyaca-SIAT el municipio se encuentra localizado en la cuenca del río Suarez y en la cuenca alta del río Chicamocha, bañado por una importante red de drenajes superficiales.(SIAT, Corpoboyaca, 2013).

CORPOBOYACA, dentro de sus competencias se encuentran la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de las Cuencas Hidrográficas (ley 1450 de 2011) y teniendo en cuenta que esta herramienta direcciona las acciones que se realizan en el territorio, para el presente estudio se considera la división por cuencas

hidrográficas oficial de la Corporación y se omite la cartografía de microcuencas del POT municipal.

El municipio carece de estudios detallados para realizar un diagnóstico hidrogeológico que permita conocer con precisión la disponibilidad y distribución del agua subterránea, aun cuando algunas formaciones geológicas tienen características deseadas, como la formación labor y tierra, formación plaeners y los depósitos aluviales cuaternarios. El recurso de agua subterránea más importante para el municipio hace referencia a la presencia de aguas termales en el sur del municipio lo que ha generado una actividad turística importante de reconocimiento nacional (IGAC, 2000)

3.1.4 Fisiografía y Suelos

En el diagnóstico del POT se realizó una actualización y levantamiento de la fisiografía y suelos del municipio a escala 1:25.000 (IGAC, 2000) en el que se estableció que el mayor porcentaje de los suelos se han desarrollado a partir de rocas sedimentarias areniscas, shales, lutitas y limolitas, y en un sector más pequeño los suelos se originaron a partir de cenizas volcánicas tipo andesita. En general el estudio revela que los suelos del municipios son jóvenes, que en las laderas presenta un drenaje superficial de bueno a excesivo, al contrario de las zonas llamas en donde el drenaje tiene una tendencia a ser pobre; teniendo en cuenta estas características se explica que la profundidad efectiva varíe a lo largo del territorio desde superficial en las montañas hasta profunda en las zonas más planas, de igual

forma existen otras limitaciones de los suelos en algunos sectores como es la baja fertilidad natural (IGAC,2000)

Existe un alta susceptibilidad a la erosión en algunos sectores, incluso se han generado procesos de erosión acelerada debido al uso inadecuado del suelo, como es la remoción de la cobertura vegetal, actividades agropecuarias intensivas y minería no sostenible, actividades que no están acordes con la vocación del suelo (Camargo, 2011)

3.1.5 Unidades fisiográficas.

La descripción de las unidades de paisaje se retomó del estudio que para el municipio se realizó durante la fase de diagnóstico del plan de ordenamiento territorial ((IGAC, 2000):

e. Relieve montañoso erosional estructural

Es la unidad más extensa del municipio, se caracteriza por las montañas, altas, montañas bajas y lomas altas.

- Cresta homoclinal disectada en arenisca cuarzosa.

Las laderas son largas y con pendientes abruptas, con cumas redondeadas a sub redondeadas, con interfluvios y pequeños llanos. La capa de meteorización es muy delgada, por lo que la dureza de la roca y las fuertes pendientes favorecen el desgaste natural de los suelos.

- Montañas ramificadas en arenisca tipo grawaca y Montañas ramificadas en rocas limoarcillosas con manto de cenizas volcánicas

Montañas masivas y abruptas en el sector de palero, recortadas por algunos drenajes. Está constituida por areniscas rojas tipo grawca. Las montañas muestran cimas estrechas y laderas fuertemente empinadas con algunas zonas de escarpes.

Las montañas ramificadas en rocas limoacillosas, presentan una mayor variedad topográfica debido a diferentes fenómenos geomorfológicos, generando por ejemplo cañadas y escarpes de erosión, rellanos inclinados, ondulados y aplanados.

- Sinclinal colgante en arenisca y limolita conglomeraticas

Corresponde a un paisaje de contrapendiente, que ha sido afectada por la falla de Boyacá, ocasionando trituración de rocas y formación de brecha de falla, encontrándose de esta forma material muy inestable y altamente susceptible a la erosión fluvial y remoción en masa.

f. Relieve montañoso colinado estructural erosional

- Loma anticlinal y cresta homoclinal en arenisca,
- Lomas anticlinal-sinclinales degradadas
- Lomas homoclinales degradadas en arcillolitas

En general estos tres paisajes se caracterizan por ser el de menor altura que se encuentra en el relieve montañoso, con cimas amplias y redondeadas. Los procesos geomorfológicos que hay que tener en cuenta para entender estos paisajes típicos del departamento de Boyacá, están relacionados con la susceptibilidad a los

movimientos en masa y la presencia de terracetas por sobrepastoreo, llegando incluso a generar procesos de deslizamientos, erosión hídrica, laminar en surcos y cárcavas. (IGAC, UPTC, 2005)

g. Relieve colinado, fluvio erosional

Se incluyen los paisajes con origen en procesos de denudación fluvio erosional.

- Cuello volcánico

Geoformas de andesita muy alterada con mantos espesos de meteorización que se conserva en sus amplias cimas con pendientes onduladas, pero que en los hombros y laderas que son moderadamente escarpadas se ha generado procesos de erosión acelerada tanto laminar como en cárcavas dejando suelos muy superficiales.

- Lomas y pedimentos

Este paisaje fue moldeada por depósitos por un sistema fluvial que dejó arena gravilla arcilla y turba en pantanos, y posteriormente por depósitos lagunares debido al lago de la sabana de Bogotá. En los sectores marginales y más elevado de este paisaje continua la sedimentación de arenas y gravillas. Siendo parte de este paisaje en donde es sostenible la explotación minera, sin olvidar que se pueden dar procesos de erosión acelerada y en cárcavas.

h. Unidades de Origen Agradacional de Piedemonte

Se caracteriza por procesos de sedimentación coluvial y aluvial, que han dado origen a unidades de pequeña extensión dispersas en el municipio.

- Cono de deslizamiento coluvial

Los coluviones están formados por fragmentos de arenisca, limolita y material de suelo con pequeños fragmentos de ceniza volcánica, con pendientes suaves y cóncavas y con una fuerte tendencia a la pedregosidad en la superficie y a lo largo del perfil del suelo.

- Abanico aluvial

En general tiene pendientes entre 3% al 25%, un relieve de ligeramente plano a fuertemente ondulado formado principalmente por el transporte de material hecho por el agua ayudado por la gravedad, Generando suelos de profundos a moderadamente profundos pero con pedregosidad superficial o a lo largo del perfil (IGAC, UPTC, 2005)

i. Unidades de origen Agradacional de Valle.

Este paisaje se encuentra en las zonas más bajas del municipio con los relieves más planos, en los valles de los ríos.

- Vallecito aluvio – Coluvial

Se encuentra en la cuenca del Rio Suarez en los ríos Tolota - venado y Chontales - Palermo, caracterizado por fragmentos de roca heterométricos y heterogéneos, geoformas alargadas y estrechas con pendientes de 1 % a 7% sujetos a inundaciones muy ocasionales pero torrenciales.

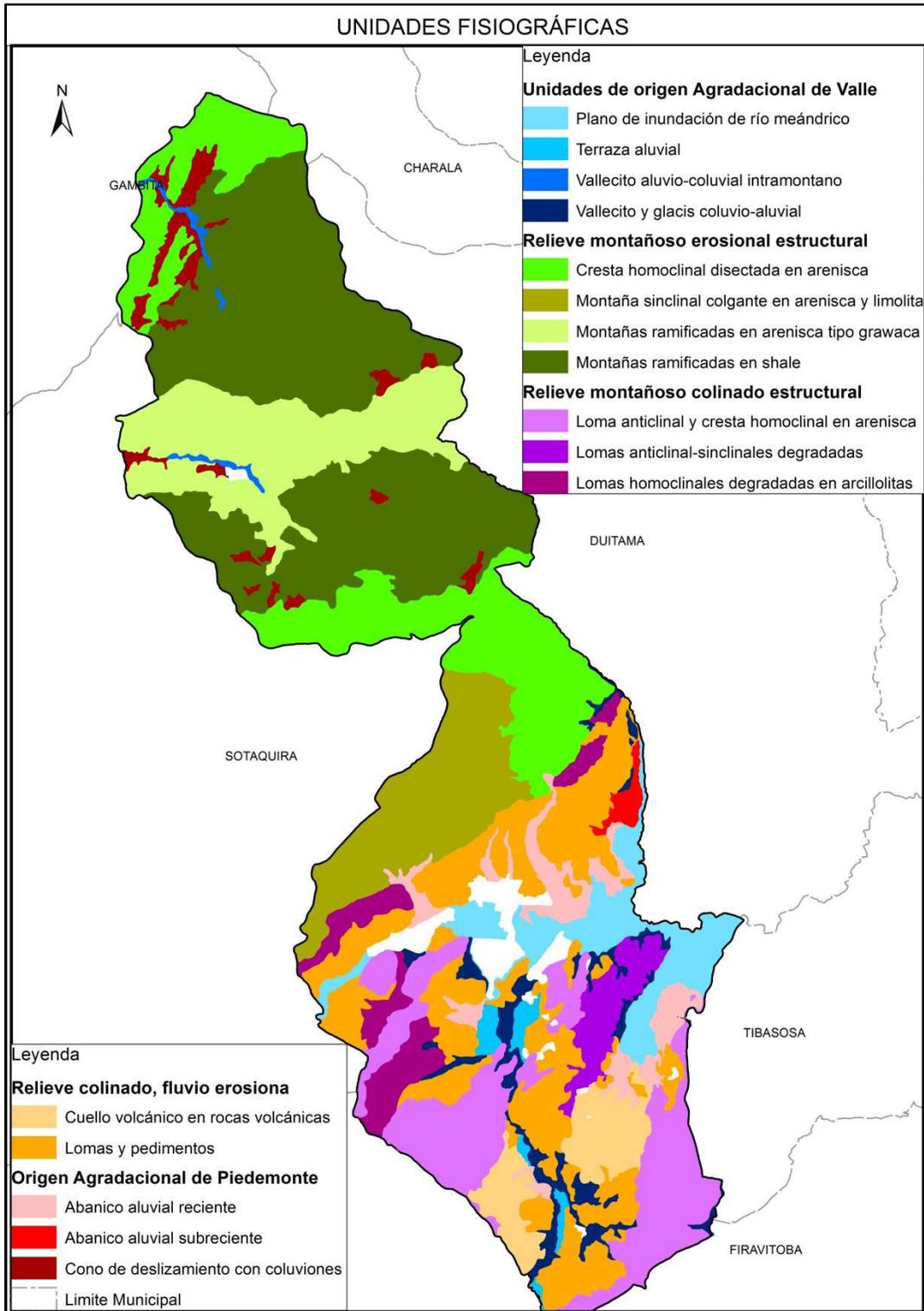
- Plano de inundación de río meándrico.

Debido a la sedimentación de la corriente del río Chicamocha durante el cuaternario superior se ha originado un amplio valle, con aluviones arcillosos y en puntos localizados aluviones orgánicos. Se genera entonces inundaciones tranquilas pero que ocasionan estancamiento temporal de las aguas.

- Terraza aluvial

Son pequeñas unidades dispersas en la quebrada honda grande, generada por niveles de sedimentación que han quedado más elevados respecto a la corriente de agua.

Mapa 2 Unidades Fisiográficas



Fuente: Elaboración propia a partir de IGAC, 2000

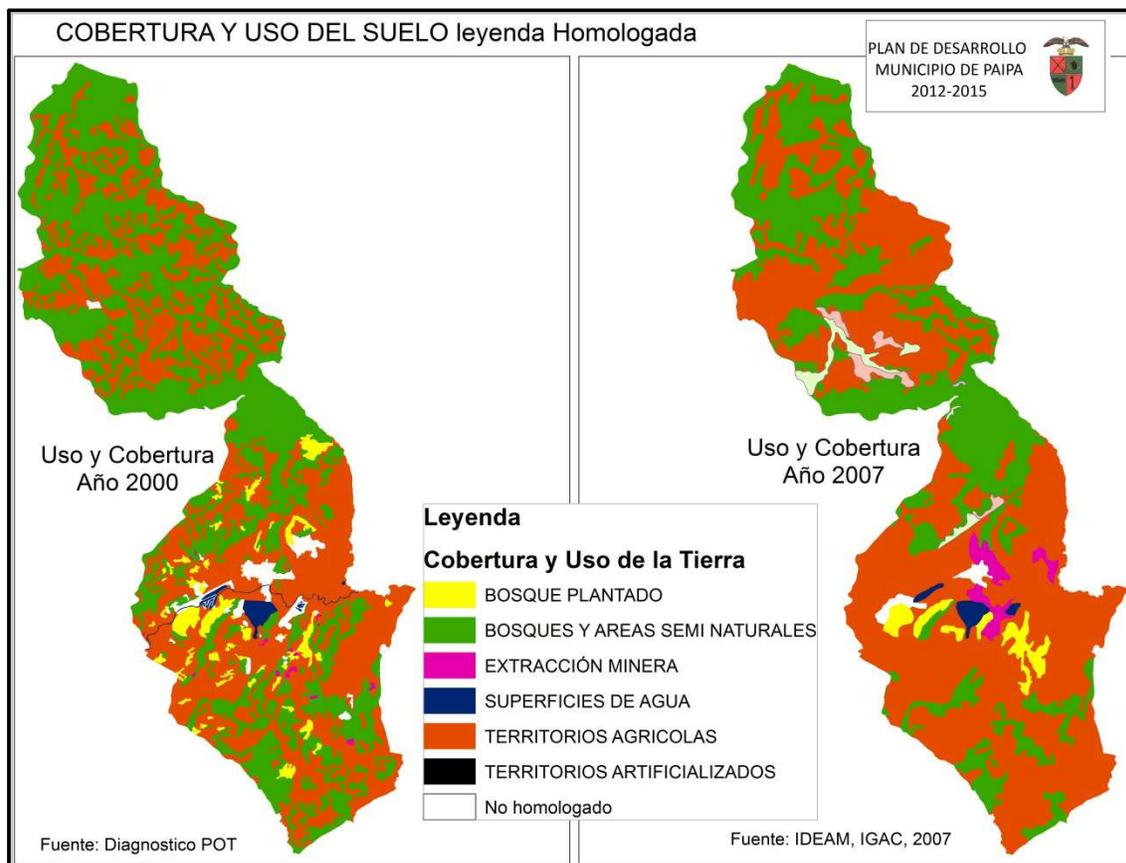
3.1.6 Cobertura y Uso de la tierra

En el diagnóstico del plan de desarrollo municipal se realizó un análisis del cambio de uso de la cobertura y uso de la tierra; encontrándose que en el municipio se presenta una importante dinámica de transformación de los ecosistemas, especialmente por ampliación de la frontera agrícola y la ausencia de programas de protección y conservación de los ecosistemas estratégicos, lo que ha ocasionado una disminución de la vegetación propia de las zonas de páramo y subpáramo, y de los relictos de bosque de Robledales, así como de las zonas de vegetación natural en donde predominan las especies Gaque y ají de páramo y los arbustales en donde se encuentran las especies Hayuelos, Uva camarona, tagua, encenillo, entre otras. (PDEM; 2012)

Estas coberturas vegetales son importantes en la conservación de la biodiversidad, regulación del ciclo hidrológico, conservación de suelos, prevención de la erosión, deslizamientos y posiblemente de las inundaciones (Cordero, Moreno & Kosmus, 2008). Presentando en el municipio una disminución de 4.747 *ha*, durante el periodo 2000 a 2007 (Camargo, 2011) que se pueden observar en tonos verdes en el siguiente mapa.

En general esta pérdida de cobertura natural se explica con el aumento de la actividad agropecuaria, que pasó de ocupar el 47% del territorio municipal al 64% con un incremento aproximado de 5.122 *ha* (Camargo, 2011)

Mapa 3 Cambio en la Cobertura y Uso de la Tierra



Fuente: Plan de Desarrollo “Rumbo a la Transformación 2012 -2015”

3.1.7 Ecosistemas estratégicos y áreas protegidas

Los ecosistemas estratégicos identificados en el municipio corresponden a las zonas de páramo, áreas de bosque protector, zonas de amortiguación de áreas protegidas, humedales, así como las áreas de protección de nacimientos, cauces y cuerpos de agua (IGAC, 2000), ecosistemas que se encuentran altamente transformados, a excepción de las 730 ha del parque natural municipal Ranchería que se encuentra conservado (Camargo, 2011)

Las áreas protegidas del municipio son el parque natural municipal Ranchería de 730 ha, el Bioparque municipal de 30 ha, así como 216 ha de la zona de amortiguación del Santuario de Fauna y Flora Guanenta y Alto río Fonce del sistema de parques nacionales naturales. (Camargo, 2011)

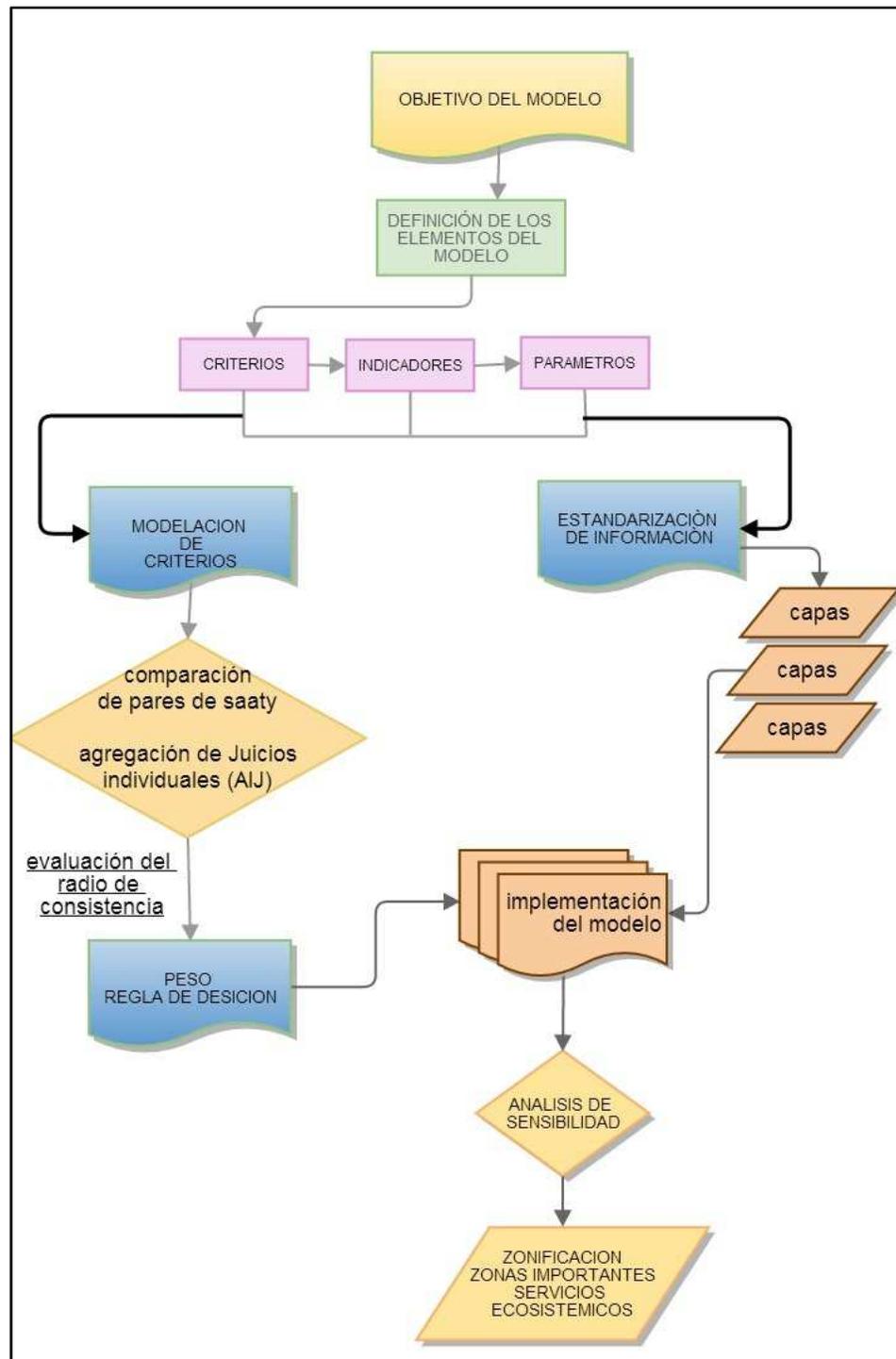
3.1.8 Actividades económicas

El municipio presenta una amplia actividad económica en los tres sectores de la economía; en el sector primario se presenta actividad agrícola, pecuaria y explotación minera; en el sector secundario diversos tipos de industrias y en el sector terciario turismo y comercio.

La actividad agrícola está representada por la producción a pequeña escala de avena, cebada, trigo, papa y legumbres y cultivos frutales típicos de clima frío; la ganadería doble propósito (leche y carne) no presenta un nivel de industrialización o valor agregado y la extracción minera de carbón, arena, piedra y puzolana se da principalmente a nivel artesanal (IGAC, 2000)

El sector secundario está representado por la pequeña, mediana y gran industria, de productos lácteos, textiles, de la construcción, que abastecen mercados locales y regionales.

3.2 FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA



Fuente: El Autor

3.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

3.3.1 Definición de los Elementos del Modelo

La conceptualización del modelo se basa en un modelo jerárquico multinivel AHP, (Analytic Hierarchy Process) propuesto por Satty; en donde los criterios de la zonificación son los servicios ecosistémicos que se desean evaluar, los subcriterios corresponden a las características de los ecosistemas que influyen en la prestación de los servicios o indicadores de los ecosistemas y las variables corresponden a los atributos que describen dichas características.

Los objetivos del modelo se identifican de acuerdo a los servicios ecosistémicos incluidos en la propuesta de zonificación teniendo en cuenta los siguientes elementos estructurantes de la planificación ambiental territorial a nivel municipal en Colombia (Zúñiga, 2011)

El pago por servicios ambientales.

- Áreas protegidas y zonas de amortiguación
- La protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica.

En la selección de criterios se tiene en cuenta los determinantes ambientales de la Corporación Autónoma Regional para el ordenamiento territorial municipal (Corpoboyaca, 2011) y en identificación de subcriterios para cada servicio ecosistémico se realiza de acuerdo a los indicadores presentados por el centro de monitoreo de la conservación mundial del PNUMA (UNEP-WCMC, 2011)

Los criterios deben cumplir en lo posible con las siguientes condiciones (Malczewski, 1999).

- Los criterios seleccionados deben cubrir los aspectos que describen el problema.
- La facilidad de descomponer el criterio de tal forma que sea posible simplificar los procesos.
- Los criterios entre si no deben ser redundantes, para esto se establece un coeficiente de correlación
- En lo posible se debe utilizar el menor número de variables, de esta forma se reduce el proceso de recolección de datos y el tratamiento de estos.

3.3.2 Modelación de Criterios

A través de una encuesta estructurada se solicita a expertos del sector ambiental que realicen una valoración por posición de los criterios e indicadores seleccionados, asignando un valor comprendido entre 1 y 9 de acuerdo a su importancia en la identificación de zonas importantes por servicios ecosistémicos con fines de planificación ambiental del territorio municipal, siendo 1 los de menor importancia y 9 los de máxima importancia.

La evaluación y ponderación de los criterios e indicadores se realiza por el método de comparación de pares de saaty, siguiendo la metodología de agregación de Juicios individuales (AIJ) para un grupo de expertos homogéneo, en donde se realiza inicialmente la comparación pareada individual por cada experto y a partir del cálculo de la media geométrica de las matrices individuales se construye la matriz agregada. (Aznar & Guijarro, 2012). Este procedimiento se realiza para los criterios y para los indicadores de cada criterio.

Los valores de los juicios de valor varían entre 1/9 a 9 de acuerdo a la siguiente escala de valor

Ilustración 1 Escala de Valor de Saaty

| | | | | | | | | |
|------------------|--------|----------|-----|-------|----------------|---|--------|---------|
| 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| Extrema | fuerte | moderada | | igual | moderada | | fuerte | extrema |
| menos importante | | | | | más importante | | | |

Fuente: (Gómez y Barredo, 2006)

La encuesta a los expertos arroja la valoración desde 1 hasta 9 de cada criterio e indicador, y a partir de la siguiente tabla de comparación se identifica el juicio de valor correspondiente a la escala de Saaty, en donde por ejemplo un experto valora el criterio A en 3 y el criterio B en 7, arroja un juicio de valor de A:B de 1/5, que indica que el criterio A es moderadamente menos importante que el criterio B y un juicio de valor recíproco para B:A de 5 en donde B tiene una importancia moderada frente a A.

Tabla 7 Calificación de los expertos a escala de Valores en la escala de Saaty

| | Valores del CRITERIO B | | | | | | | | | valor asignado por el experto | |
|------------------------|------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------------------|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| Valores del CRITERIO A | 1 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | 1/7 | 1/8 | 1/9 | juicios de valor en donde se muestra la importancia de A frente a B |
| | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | 1/7 | 1/8 | |
| | 3 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | 1/7 | |
| | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | |
| | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | |
| | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | |
| | 7 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | |
| | 8 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | |
| | 9 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | |

Fuente: Elaboración propia a partir de la escala de valor de Saaty presentada por Gómez y Barredo, 2006

Las matrices se construyen para cada experto, y luego para cada comparación se calcula la media geométrica: mediante la fórmula:

| | |
|--|--|
| $MG = \sqrt[n]{(X_1)(X_2)\cdots(X_n)}$ | <p>MG= es la media geométrica</p> <p>n = es el número de valores</p> <p>x= son los valores desde X_1 hasta X_n</p> |
|--|--|

Con el fin de ilustrar el procedimiento propuesto por (Aznar & Guijarro, 2012) se plantea un ejemplo: el caso de 2 criterios a evaluar por 2 expertos, para lo cual se tendrían dos matrices de comparación:

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|----|---|---|---|---|---|-----|---|----|---|----|--|--|---|---|---|---|---|---|-----|---|----|---|----|--|
| <table border="1" style="width: 100%;"> <tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr> <tr><td>A</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>B</td><td>1/2</td><td>1</td></tr> <tr><td>CR</td><td>=</td><td>0%</td></tr> </table> | | A | B | A | 1 | 2 | B | 1/2 | 1 | CR | = | 0% | <p>Para el experto 1 el criterio A es levemente más importante que B</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr> <tr><td>A</td><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>B</td><td>1/5</td><td>1</td></tr> <tr><td>CR</td><td>=</td><td>0%</td></tr> </table> | | A | B | A | 1 | 5 | B | 1/5 | 1 | CR | = | 0% | <p>Para el experto 1 el criterio A es moderadamente más importante que B</p> |
| | A | B | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | 1/2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CR | = | 0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | A | B | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | 1 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | 1/5 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CR | = | 0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Luego se calcula la media geométrica para cada par de comparaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Comparación A:B = media Geométrica (2, 5) = 3.1623 • Comparación B:A= media Geométrica (1/2, 1/5) = media Geométrica (0.5, 0.2) = 0.31623 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Con estos resultados se construye la matriz de agregación de los juicios individuales y se calcula el radio de consistencia, si la matriz es consistente se procede a calcular los vectores propios (ver valores de consistencia descritos en el marco teórico).

| | Criterio A | Criterio B | VECTOR PROPIO |
|------------|------------|------------|---------------|
| Criterio A | 1 | 3.1623 | 0.7597 |
| Criterio B | 0.3162 | 1 | 0.2403 |
| CR | 0.00% | < 0% | 1.0000 |

Finalmente con estos vectores se obtiene la ecuación resultante (regla de decisión)

$$(A*0.7597)+(B*0.2403)$$

De esta forma se obtiene el peso de cada indicador y cada criterio para construir las reglas de decisión para elaborar los mapas de criterios (servicio ecosistémico) y de la zonificación por servicios.

3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

3.4.1 Estandarización y Generación de los Mapas

Inicialmente es necesario estandarizar los mapas de entrada al modelo, de tal forma que tengan "...una escala comparable en tipo, rango de extensión, unidad de medida, eventual y posición del cero..." (Gómez y Barredo, 2006). Para la estandarización se asigna a las leyendas de las capas espaciales de las variables un valor numérico entero de cero a cuatro, siendo 0 las unidades que no representan importancia y 4 las variables que favorecen totalmente la prestación del servicio ecosistémico y a las variables que representan restricción al comportarse

como factores limitantes se les asigna un valor que permita identificarlo, por ejemplo 999.

0: Nulo
1: Bajo
2: Medio
3 Alto
4: Muy Alto
999: Restricción.

Se deben generar los mapas temáticos para cada uno de los indicadores, siendo estos mapas de indicadores las entradas al modelo para obtener los mapas de los criterios y estos mapas de criterios a su vez son las entradas para obtener el mapa de la zonificación. De acuerdo a las reglas de decisión que son las ecuaciones obtenidas en la construcción del modelo. Uso de Software GIS.

3.4.2 Software GIS

La implementación del modelo se realiza teniendo en cuenta las siguientes herramientas con que cuenta el software ArcGis para realizar análisis espacial multicriterio (Sendra *et al*, 2008)

- *ModelBuilder*: Permite crear un flujo de trabajo en forma de una secuencia de pasos en la que se divide el proceso de evaluación multicriterio: Automatización de rutinas de Reclasificación, álgebra de mapas y Superposición ponderada.

| Herramienta | Descripción | Software | Fase |
|------------------|--|----------|-----------------------|
| Reclasify | Se puede utilizar cuando se busque estandarizar la información mediante una escala de valores. El proceso no es automático y es el usuario quien ingresa directamente el valor. | ArcGis | Estandarización |
| Divide | Permite estandarizar imágenes de manera lineal a través de una función aritmética de división para obtener una imagen similar a la del método de máxima estandarización | ArcGis | Estandarización |
| Weighted overlay | Estandariza los criterios a partir de diferentes escalas de valores y permite el cálculo de múltiples criterios asignando el peso a cada factor de manera directa en porcentaje para obtener un mapa de aptitud. | ArcGis | Peso de los criterios |
| Weighted sum | Multiplca el valor estandarizado de cada factor por el peso asignado. Es útil para evaluar diferentes alternativas | ArcGis | Peso de los criterios |

Fuente: (Sendra *et al*, 2008)

La información utilizada para probar el modelo es la cartografía a escala 1:25.000 del plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Paipa, y la cartografía escala 1:25.000 de la zonificación ambiental de los planes de ordenación y manejo de las cuencas. POMCA.

3.5 ANALISIS DE SENSIBILIDAD Y AJUSTE DEL MODELO

El análisis de sensibilidad comprende la última etapa del modelamiento y busca demostrar que tan confiable es la versión simplificada de la realidad, de tal forma, que este modelo creado tenga un buen nivel de confiabilidad (Gómez y Barredo, 2006). En este sentido se realiza para el modelo propuesto el análisis de sensibilidad variando el método de puntuación de criterios e indicadores.

Para este caso se realizará un análisis comparativo entre el método de pares de Saaty, con el método de sumatoria lineal ponderada y el método de tasación simple.

a. Métodos de ponderación de los criterios e indicadores. Método de tasación simple

Para el método de tasación simple se solicita a los expertos realizar una calificación de los criterios que representará el porcentaje de importancia frente a los otros factores, de tal forma, que la suma de los valores asignados sea 100. (Gómez y Barredo, 2006) Esta evaluación de los expertos no se incorporó en el modelo, únicamente se retoma con fines de evaluación.

Finalmente, los resultados de la evaluación se normalizan en la misma escala de valor, en un rango de -1 a 4. De tal forma que los mapas resultantes por los dos métodos sean comparables.

b. Evaluación de los resultados

La variación se evalúa mediante el índice de diferencia media por pixel propuesto por Orán *et al*, 2011 basándose en *Lodwick et al*, 1990

Ecuación 1 Índice de diferencia media por pixel

$$S = [\text{suma} (X_i \text{ de capa original} - X_i \text{ de capa modificada}) / \text{número de Pixeles } X_i]$$

En donde:

S= diferencia media entre los valores y X_i = valor en el mapa en el pixel i

Fuente: Orán *et al*, 2011

4 RESULTADOS

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

4.1.1 Definición de los Elementos del Modelo

a. Objetivo del modelo

Realizar una zonificación que permita determinar unidades homogéneas de servicios ambientales que prestan los ecosistemas del municipio de Paipa con el fin de incorporarlos en la planificación ambiental del territorio.

b. Definición de los Criterios

Los criterios para el modelo están representados por los servicios ecosistémicos, en la identificación de estos servicios ecosistémicos se tuvo en cuenta la determinante ambiental relacionada con la conservación y protección de los recursos naturales y del medio ambiente, (Corpoboyaca, 2011), identificando los siguientes servicios ecosistémicos como relevantes para el municipio de Paipa, de acuerdo al diagnóstico ambiental municipal (IGAC; 2000 & Camargo, 2011)

- **Servicio ecosistémico de soporte asociado a la biodiversidad.**

Se identificaron como importantes en el municipio el servicio de Hábitat y Biodiversidad para el mantenimiento del equilibrio ecológico y de los procesos evolutivos (UNEP-WCMC, 2011).

Los subcriterios relacionados con este servicio ecosistémico que se identificaron en las determinantes de la Corporación (Corpoboyaca, 2011):

1. Áreas de páramo y ecosistemas asociados: bosque alto andino, subpáramo, paramo propiamente dicho y súper páramos.
 2. Áreas forestales protectoras (áreas periféricas a nacimientos, cauces de agua permanentes o no lagos o depósitos de agua, ciénagas pantanos y humedales, terrenos superiores a 45°)
 3. Áreas protegidas que integran el sistema regional de áreas protegidas- SIRAP en su jurisdicción.
 4. Áreas con bosque protector
 5. Áreas para la protección de fauna
 6. Áreas o función de amortiguación de áreas protegidas en su territorio
 7. Áreas potenciales para declaratoria de áreas protegidas.
- **Servicio ecosistémico de provisión de agua asociado a la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica.**

En la identificación de los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua se tiene en cuenta el decreto 0953 del 2013 del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, que define las áreas de importancia estratégica para la conservación y recuperación de ecosistemas que prestan los servicios ambientales asociados al recurso hídrico, con el fin de implementar esquemas de pago por servicios ambientales o adquisición de predios para la conservación hídrica en los municipios.

De los subcriterios que establece el decreto se tienen en cuenta los siguientes para el servicio ecosistémico de provisión de agua

1. Presencia de drenajes superficiales, manantiales, afloramientos y humedales. (aun cuando el decreto no lo incorpora se incluye además la cercanía)
2. Presencia de zonas importantes de recarga de acuíferos o suministro hídrico

3. Nulo o bajo grado de intervención de las coberturas vegetales y los ecosistemas naturales.
 4. Presión antrópica sobre los ecosistemas naturales
 5. Grado de amenaza de pérdida o alteración de los ecosistemas naturales por factor antrópico.
 6. Fragilidad de los ecosistemas naturales.
- **Servicio ecosistémico de regulación asociado a la prevención de la erosión.**

En la identificación de este servicio se tiene en cuenta la susceptibilidad a la erosión, la susceptibilidad a los deslizamientos y procesos erosivos actuales. Así como el uso actual al territorio como factor detonante.

c. Definición de los Sub criterios (indicadores)

La definición de los subcriterios, entendidos estos como los indicadores de los ecosistemas permite construir los escenarios de análisis de potencialidad para ofertar los tres servicios identificados en la planificación territorial municipal como los más desarrollados en la política ambiental colombiana.

Por otro lado las variables que describen estos indicadores, están relacionados con los niveles de información espacial de forma integral, o con uno o más campos de las tablas de atributos que permiten mediante procesos de análisis espacial definir dichos indicadores.

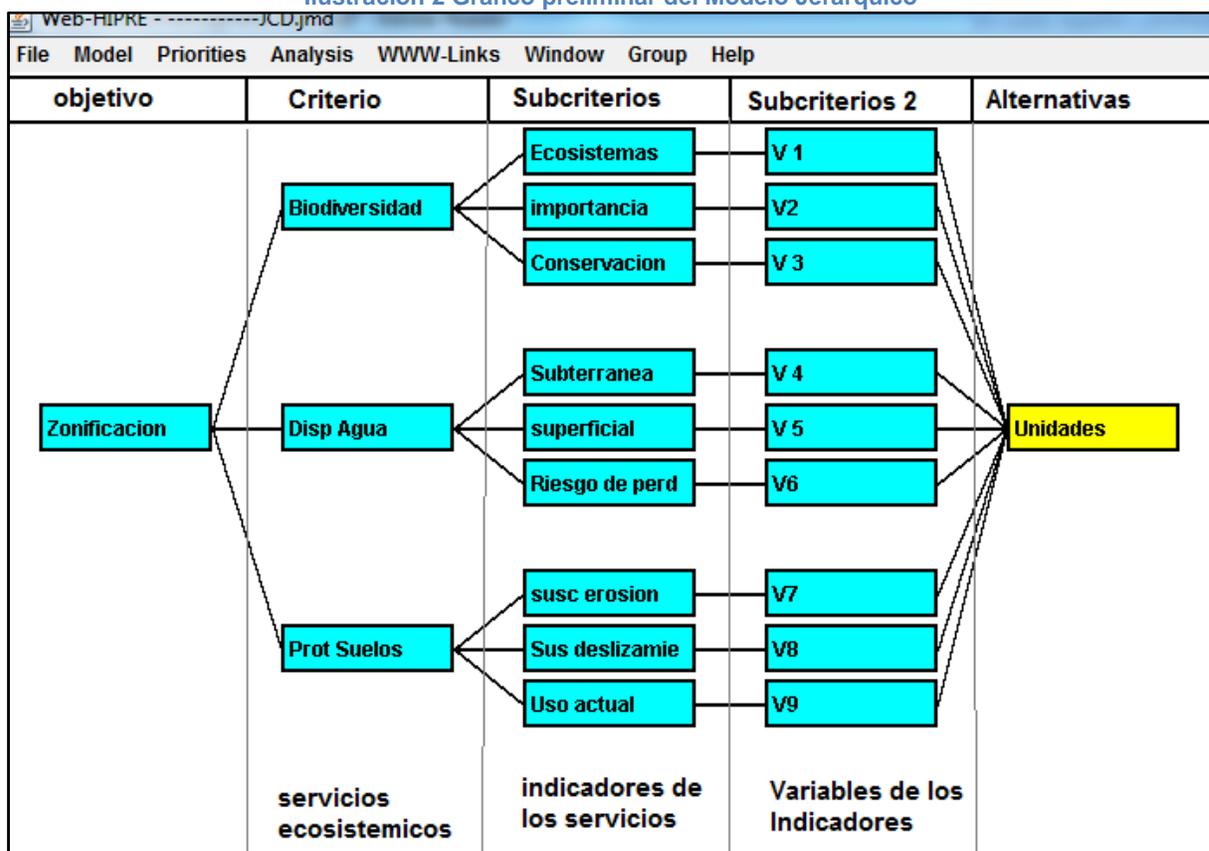
Tabla 8 Elementos del modelo

| Criterio | código criterio | Indicador | código del indicador | Variable | Código variable |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------|
| Servicio ecosistémico | A | Ecosistemas importantes | A1 | Ecosistemas | A11 |

| Criterio | código criterio | Indicador | código del indicador | Variable | Código variable | |
|--|------------------------|--|-----------------------------|---|------------------------|-----|
| de soporte asociado a la biodiversidad. | | Transformación | A2 | Grado de Transformación | A21 | |
| | | Importancia para la conservación Regional | A3 | Superficie de pérdida a nivel municipal con respecto a la Superficie de pérdida en Boyacá | A31 | |
| Servicio ecosistémico de provisión de agua asociado a la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica | B | Disponibilidad de agua subterránea | B1 | Presencia de zonas importantes de recarga de acuíferos | B11 | |
| | | Disponibilidad de agua superficial | B2 | Presencia de drenajes superficiales, cuerpos de agua manantiales, afloramientos y humedales en general. | B21 | |
| | | | | Nulo o bajo grado de intervención de las coberturas vegetales y los ecosistemas naturales. | B22 | |
| | | Riesgo de perder el servicio ecosistémico de provisión de agua | B3 | Grado de conflicto de uso del suelo | B31 | |
| | | | | Cercanía a minas | B32 | |
| Servicio ecosistémico de regulación asociado a la prevención de la erosión | C | Susceptibilidad a la erosión. | C1 | Presencia de zonas con probabilidad de generar procesos erosivos | C11 | |
| | | | | Procesos erosivos que ya se han generado | C12 | |
| | | Susceptibilidad a los deslizamientos | C2 | Zonas con algún grado de probabilidad de la ocurrencia de desplazamiento de masas de tierra o rocas en forma súbita o lenta en zonas de pendiente | C21 | |
| | | Cobertura de la tierra | C3 | Coberturas naturales, seminaturales o transformadas en las zonas susceptibles a la erosión o los deslizamientos. | | C31 |

Fuente: El estudio

Ilustración 2 Grafico preliminar del Modelo Jerárquico



Fuente: Elaboración Propia a partir del Software HIPRE

4.1.2 Modelación de Criterios y Definición de la regla de decisión.

Se realizó la consulta a un grupo homogéneo de expertos (Aznar & Guijarro, 2012) del Sector ambiental, con estudios de postgrado en diferentes temáticas relacionadas directa o indirectamente con el estudio, investigación, planeación de los servicios ecosistémicos incluidos en la evaluación.

Los expertos asignaron un valor a cada criterio, en un rango de 1 a 9 excluyendo la posibilidad de asignar un valor nulo, de acuerdo al juicio de valor de cada experto, de forma individual.

Todos los expertos coincidieron en asignar el máximo valor al criterio 2, seis expertos consideraron que el criterio 1 estaba en un segundo rango de importancia y solo dos expertos consideraron los criterios consideraron el criterio 3 en un segundo lugar de importancia. (Ver Anexo)

Se realizó la evaluación y ponderación de los criterios e indicadores por el método de comparación de pares de saaty, siguiendo la metodología de agregación de juicios individuales (AIJ) para un grupo de expertos homogéneo, mediante la ayuda de la hoja de cálculo de Excel “programa de cálculo” que permite realizar los cálculos de la consistencia de la matriz y de los vectores propios (Aznar & Guijarro, 2012).

a. Evaluación de la valoración de los criterios

Para cada uno de los expertos se realizó una matriz de comparación por pares de 3X3, con un valor máximo de consistencia del 5%. Los resultados para cada experto se encuentran en el Anexo en donde se aprecia que la consistencia en todos los casos está por debajo del 5%, por lo que se consideran todas las matrices consistentes.

Luego se calculó la media geométrica para cada par de comparaciones, la agregación se realizó de la siguiente forma:

Comparación A: B = Media Geométrica (1/5, 1/2, 1/3, 1/5, 1/5, 1/2, 1/3, 1/5)

Comparación A: B = Media Geométrica (0.20, 0.50, 0.33, 0.20, 0.20, 0.50, 0.33, 0.20)
= 0.2857

Comparación A: C= Media Geométrica (3, 4, 1/3, 2, 3, 5, 3, 1/3)

Comparación A: C= Media Geométrica (3, 4, 0.333, 2, 3, 5, 3, 0.333) = 1.8193

Comparación B: C = Media Geométrica (8, 5, 1, 6, 8, 6, 6, 3) = 4.6195

Comparación B: A = Media Geométrica (5, 2, 3, 5, 5, 2, 3, 5) = 3.4996

Comparación C: A = Media Geométrica (1/3, 1/4, 3, 1/2, 1/3, 1/5, 1/3, 3)=

Comparación C: A = Media Geométrica (0.33, 0.25, 3.00, 0.50, 0.33, 0.20, 0.33, 3.00)
= 0.5497

Comparación C: B = Media Geométrica (1/8 1/5 1 1/6 1/8 1/6 1/6
1/3)

Comparación C: B = Media Geométrica (0.125, 0.2, 1, 0.167, 0.125, 0.167,
0.167, 0.33) = 0.2165

Con estos resultados se elaboró la matriz de comparación agregada y se calcularon los vectores propios para cada criterio en una matriz consistente de 3X3, ya que se obtuvo un radio de consistencia de 1.1% menor que el 5% permitido.

Tabla 9 Matriz resultante de Agregación de Juicios Individuales de criterios.

| | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
|------------|-------------|------------|-------------|---------------|
| Criterio A | 1 | 0.29 | 1.82 | 0.2102 |
| Criterio B | 3.50 | 1 | 4.62 | 0.6612 |
| Criterio C | 0.55 | 0.22 | 1 | 0.1286 |
| CR | 1.10% | < 5% | | 1.0000 |

Fuente: El Estudio

De esta forma, se obtuvo la regla de decisión para generar el mapa zonas importantes por servicios ecosistémicos:

Ecuación 2 Regla de Decisión de zonas importantes

$$ZI = 0.2102 * A + 0.6612 * B + 0.1286 * C$$

ZI= zonas importantes

A= Servicio ecosistémico de soporte asociado a la biodiversidad.

B= Servicio ecosistémico de provisión de agua asociado a la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica

C= Servicio ecosistémico de regulación asociado a la prevención de la erosión

b. Evaluación de la valoración de los Indicadores por cada experto y agregación por juicios individuales

Para los indicadores se siguió el mismo procedimiento descrito anteriormente para los criterios, las matrices de cada experto se pueden consultar en el Anexo. A partir de estas matrices se elaboró la siguiente tabla, en donde se resume los resultados de las comparaciones descritas en las matrices individuales.

Tabla 10 Comparación por pares de indicadores para el criterio A

| Comparación Pareda de indicadores | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Experto 6 | Experto 7 | Experto 8 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A1:A2 | 8 | 5 | 6 | 6 | 5 | 3 | 7 | 4 |
| A1:A3 | 5 | 2 | 2 | 2 | 8 | 3 | 4 | 1 |
| A2:A3 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/5 | 3 | 1 | 1/3 | 1/4 |
| A2:A1 | 1/8 | 1/5 | 1/6 | 1/6 | 1/5 | 1/3 | 1/7 | 1/4 |
| A3:A1 | 1/5 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/8 | 1/3 | 1/4 | 1 |
| A3:A2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 1/3 | 1 | 3 | 4 |

Fuente: El estudio

Para facilitar el cálculo de la media geométrica los valores representados en forma de fracción se convirtieron a números decimales:

Tabla 11 Comparación por pares de indicadores para el criterio A, en valores decimales

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Experto 6 | Experto 7 | Experto 8 | Media geométrica |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| A1:A2 | 8 | 5 | 6 | 6 | 5 | 3 | 7 | 4 | 5.28 |
| A1:A3 | 5 | 2 | 2 | 2 | 8 | 3 | 4 | 1 | 2.81 |
| A2:A3 | 0.33 | 0.25 | 0.2 | 0.2 | 3 | 1 | 0.33 | 0.25 | 0.41 |
| A2:A1 | 0.13 | 0.2 | 0.17 | 0.17 | 0.20 | 0.33 | 0.14 | 0.25 | 0.19 |
| A3:A1 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.13 | 0.33 | 0.25 | 1 | 0.36 |
| A3:A2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 0.33 | 1 | 3 | 4 | 2.43 |

Fuente: El estudio

Teniendo en cuenta los valores anteriores se construyó la matriz de Agregación de Juicios Individuales, en donde se obtuvo un radio de consistencia admisible para una matriz de 3X3 y se calcularon los vectores propios para los 3 indicadores.

Tabla 12 Matriz resultante de Agregación de Juicios Individuales de los indicadores del Criterio A

| | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO |
|----|-------|------|------|---------------|
| A1 | 1.00 | 5.28 | 2.81 | 0.6403 |
| A2 | 0.19 | 1.00 | 0.41 | 0.1112 |
| A3 | 0.36 | 2.43 | 1.00 | 0.2486 |
| CR | 0.73% | < 5% | | 1.0000 |

De esta forma se obtuvo la ecuación para generar el mapa de zonas importantes para el Servicio ecosistémico de soporte asociado a la biodiversidad

$$A = 0.64 \cdot A1 + 0.11 \cdot A2 + 0.25 \cdot A3$$

A= zonas importantes por Servicio ecosistémico de soporte asociado a la biodiversidad.

A1= Ecosistemas importantes
 A2= Grado de Transformación
 A3= Importancia para la conservación

Tabla 13 Comparación por pares de indicadores para el criterio B

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Experto 6 | Experto 7 | Experto 8 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| B1:B2 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/3 |
| B1:B3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 1 | 5 | 5 |
| B2:B3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 6 | 8 |
| B2:B1 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| B3:B1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1/5 |
| B3:B2 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1/6 | 1/8 |

Tabla 14 Comparación por pares de indicadores para el criterio B, en valores decimales

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Experto 6 | Experto 7 | Experto 8 | Media Geométrica |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| B1:B2 | 0.25 | 0.33333 | 0.5 | 1 | 1 | 0.33333 | 0.5 | 0.33333 | 0.468 |
| B1:B3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 1 | 5 | 5 | 3.327 |
| B2:B3 | 5.00 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 6.00 | 8 | 5.089 |
| B2:B1 | 4.00 | 3 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 3 | 2.135 |
| B3:B1 | 0.5 | 0.33333 | 0.25 | 0.2 | 0.20 | 1.00 | 0.2 | 0.2 | 0.301 |
| B3:B2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.20 | 0.33333 | 0.16667 | 0.125 | 0.196 |

Teniendo en cuenta los valores de la media geométrica de cada comparación pareada se elaboró la matriz de 3X3 y se calcularon los vectores propios para los 3 indicadores, dado que la matriz resultante tiene una consistencia de 1.19%

Tabla 15 Matriz resultante de Agregación de Juicios Individuales de los indicadores del Criterio B

| | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO |
|--|----|----|----|---------------|
| | | | | |

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|--------|
| B1 | 1 | 0.468 | 3.327 | 0.3080 |
| B2 | 2.135 | 1 | 5.089 | 0.5885 |
| B3 | 0.301 | 0.196 | 1 | 0.1035 |
| CR | 1.19% | < 5% | | 1.0000 |

Fuente: El Estudio

La ecuación resultante para el criterio B es:

Ecuación 3 Criterio B

$$B = 0.31 * B1 + 0.59 * B2 + 0.10 * B3$$

B= Servicio ecosistémico de provisión de agua asociado a la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica

B1= Disponibilidad de agua subterránea

B2= Disponibilidad de agua superficial

B3= Riesgo de perder el servicio ecosistémico de provisión de agua

Tabla 16 Comparación por pares de indicadores para el criterio C

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Experto 6 | Experto 7 | Experto 8 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C1:C2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1/3 | 2 | 1/2 |
| C1:C3 | 5 | 3 | 1/2 | 5 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| C2:C3 | 5 | 3 | 1/3 | 3 | 1/2 | 5 | 1 | 2 |
| C2:C1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 3 | 1/2 | 2 |
| C3:C1 | 1/5 | 1/3 | 2 | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 1 |
| C3:C2 | 1/5 | 1/3 | 3 | 1/3 | 2 | 1/5 | 1 | 1/2 |

Tabla 17 Comparación por pares de indicadores para el criterio C, en valores decimales

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Experto 6 | Experto 7 | Experto 8 | Media Geométrica |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| C1:C2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0.33333 | 2 | 0.5 | 1.297 |
| C1:C3 | 5 | 3 | 0.5 | 5 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2.258 |
| C2:C3 | 5.00 | 3 | 0.33333 | 3 | 0.5 | 5 | 1.00 | 2 | 1.715 |
| C2:C1 | 1.00 | 1 | 0.50 | 0.33 | 0.25 | 3.00 | 0.50 | 2 | 0.771 |
| C3:C1 | 0.2 | 0.33333 | 2 | 0.2 | 0.33 | 0.33 | 0.5 | 1 | 0.443 |
| C3:C2 | 0.2 | 0.33333 | 3 | 0.33333 | 2.00 | 0.2 | 1 | 0.5 | 0.583 |

Tabla 18 Matriz resultante de Agregación de Juicios Individuales de los indicadores del Criterio C

| | C1 | C2 | C3 | VECTOR PROPIO |
|----|-------|-------|-------|---------------|
| C1 | 1 | 1.297 | 2.258 | 0.452 |
| C2 | 0.771 | 1 | 1.715 | 0.347 |
| C3 | 0.443 | 0.583 | 1 | 0.201 |
| CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 |

La ecuación resultante para el criterio C es:

Ecuación 4 Criterio C

$$C = 0.45 * C1 + 0.35 * C2 + 0.20 * C3$$

C= Servicio ecosistémico de regulación asociado a la prevención de la erosión

C1= Susceptibilidad a la erosión

C2= Susceptibilidad a los deslizamientos

C3= Coberturas en las zonas de alta pendiente

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

4.2.1 Preparación de los datos

Con el fin de generar los mapas temáticos y disponer de la cartografía necesaria para realizar la zonificación se realizó una identificación de la información teniendo en cuenta el nivel de detalle requerido y el ámbito del estudio, para cada uno de los parámetros, teniendo una temporalidad de la información del año 2000 y una escala cartográfica de 1:25.000 para el municipio de Paipa.

Para todos los parámetros identificados se identificó una fuente de información oficial con un nivel de detalle adecuado que permite cumplir con los objetivos del estudio (ver Anexo)

4.2.2 Estandarización y Generación de los Mapas de Indicadores

A continuación se describe los resultados de la estandarización y la forma en que se generaron las escalas comparables de las variables. Los mapas resultantes por cada variable se pueden consultar en el anexo.

a. Indicador A1, Ecosistemas importantes

Identifica los ecosistemas importantes para la planificación territorial en un municipio.

De acuerdo a la metodología propuesta los ecosistemas importantes en la planificación territorial de un municipio son los bosques alto andinos, las áreas de páramo y ecosistemas asociados (subpáramo, páramo propiamente dicho y superpáramos), áreas periféricas hídricas (nacimientos, cauces de agua permanentes o no lagos o depósitos de agua, ciénagas pantanos y humedales), Áreas protegidas que integran el sistema de áreas protegidas, Áreas con pendiente mayor a 45°. (Corpoboyaca, 2011)

Los expertos consultados consideraron que todos los ecosistemas seleccionados tienen el mismo grado de importancia para la conservación, por lo que se les asignó el máximo valor.

Tabla 19 Estandarización de variables del indicador A1

| Atributo | Valoración |
|----------|------------|
|----------|------------|

| | |
|-----------------------------------|---|
| Ecosistemas importantes | 4 |
| Zonas sin ecosistemas importantes | 0 |

Fuente: El estudio

b. Indicador A2, Grado de Transformación

En la estandarización se generó inicialmente el mapa de ecosistemas naturales, semi naturales y transformados a partir del mapa de uso y cobertura (IGAC, 2000)

Se considera un ecosistema natural (afloramientos rocosos, aguas continentales naturales, arbustales, bosques naturales, glaciares y nieves, herbazales, herbáceas y arbustivas costeras, hidrofita continental, lagunas costeras, zonas desnudas, sin o con poca vegetación) la semi transformada está relacionada con la vegetación secundaria y la transformada son áreas artificiales, como los bosques plantados y territorios agrícolas y pecuarios (IDEAM, 2011). Las zonas de minería y zonas urbanas son factores limitantes por su alto grado de transformación

Mapa 4 Estandarización de variables del indicador A2

| Grado de Transformación | Valoración |
|--|-------------------|
| Ecosistema Natural | 4 |
| Ecosistema Seminatural | 2 |
| Ecosistema Transformado | 0 |
| Zonas construidas o de extracción minera | 999 |

Fuente: El estudio

c. Indicador A3, Importancia para la conservación Regional

La superficie de pérdida a nivel municipal con respecto a la superficie de pérdida en Boyacá, permite inferir cuales ecosistemas municipales se deben conservar en un contexto regional.

De esta forma, se encontró que los bosques del orobioma medio de los andes en climas frío seco, han tenido una mayor pérdida a nivel regional, por lo que se considera que estos bosques en el municipio tienen una importancia más alta en su conservación.

Tabla 20 Estandarización de variables del indicador A3

| Clima | Bioma | Cobertura | Valoración |
|-----------------|------------------|-------------------|------------|
| Frío Húmedo | Orobiomas medios | Arbustales | 3 |
| Frío Húmedo | Orobiomas medios | Arbustales | 3 |
| Frío Húmedo | Orobiomas medios | Bosques naturales | 3 |
| Frío Húmedo | Orobiomas medios | Bosques naturales | 3 |
| Frío Húmedo | Orobiomas medios | Bosques naturales | 3 |
| Frío Seco | Orobiomas medios | Bosques naturales | 4 |
| Frío Seco | Orobiomas medios | Bosques naturales | 4 |
| Frío Seco | Orobiomas medios | Bosques naturales | 4 |
| Frío Seco | Orobiomas medios | Bosques naturales | 4 |
| Frío Seco | Orobiomas medios | Bosques naturales | 4 |
| Frío Seco | Orobiomas medios | Bosques naturales | 4 |
| Muy Frío Húmedo | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Húmedo | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Seco | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Seco | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Seco | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Seco | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Seco | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Seco | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Seco | Orobiomas altos | Bosques naturales | 2 |
| Muy Frío Seco | Orobiomas altos | Herbazales | 2 |

Fuente: El Estudio

d. Indicador B1, Disponibilidad de agua subterránea

La información de la disponibilidad de agua subterránea se retomó del mapa hidrogeológico, que valora la capacidad de las rocas para permitir la infiltración, el almacenamiento del agua al interior.

Mapa 5 Estandarización de variables del indicador B1

| Potencial hidrogeológico | Valoración |
|--------------------------|------------|
| Alto | 4 |
| Moderado a alto | 3 |
| Moderado | 2 |
| Bajo | 1 |
| Nulo | 0 |

Fuente: El estudio

e. Indicador B2, Presencia de agua superficial

Para este estudio, se tuvo en cuenta el mapa de los cuerpos de agua y de las rondas hídricas de los drenajes y de los cuerpos de agua, realizando previamente un buffer.

Tabla 21 Estandarización de variables del indicador B2

| Atributo | Valoración |
|-----------|------------|
| Presencia | 4 |
| Ausencia | 0 |

Fuente: El estudio

f. Indicador B3, Riesgo de perder el servicio ecosistémico de provisión de agua

El riesgo de perder el servicio ecosistémico es un indicador compuesto por dos variables; el conflicto de uso del suelo como un indicador de sobreexplotación del recurso y la cercanía a zonas de extracción minera, una de las actividades económicas más importantes en el sector rural del municipio.

Tabla 22 Estandarización de la variable 1 del indicador B3

| Conflicto de uso del suelo | |
|-----------------------------------|-------------------|
| Atributo | Valoración |
| Alto | 3 |
| Medio | 2 |
| Bajo | 1 |
| En equilibrio | 0 |

Fuente: El estudio

Tabla 23 Estandarización de la variable 2 del indicador B3

| Cercanía a minas 300m | |
|------------------------------|-------------------|
| Atributo | Valoración |
| Presencia | 3 |
| Ausencia | 0 |

Fuente: El estudio

De acuerdo a la consulta a los expertos el riesgo de perder el servicio ecosistémico de provisión de agua está definido por: $Riesgo=0.4*conflicto+ 0.6*cercanía a minas$.

Para realizar el cálculo se convirtieron los datos a formato raster con un tamaño de celdas de 5 metros y luego se realizó el cálculo utilizando la herramienta "Weighted Sum" de spatial analyst de ArcGis. Los mapas de los parámetros se pueden consultar en el Anexo y finalmente el raster de salida se reclasificación manual del raster obtenido en valores desde 0 hasta 4.

g. Indicador C1, Susceptibilidad a la erosión

El sur del municipio en pendiente moderada a escarpada presenta zonas con diferentes grados de susceptibilidad a la erosión, en donde, el uso inadecuado del suelo y el cambio en la cobertura vegetal ha acelerado este proceso, generando erosión localizada y generalizada.

El indicador C1 está compuesto por la susceptibilidad a la erosión y los puntos en donde esos procesos erosivos ya se han dado, que los expertos consideraron con el mismo valor de importancia en el cálculo del indicador, de tal forma que, *Susceptibilidad a la erosión=0.5*susceptibilidad+ 0.5*procesos erosivos dados.*

Para la zona de influencia de las zonas erosionadas se realizó un buffer de 50 m y se convirtieron los datos a formato raster con un tamaño de celdas de 5 metros, finalmente se realizó el cálculo del indicador con "Weighted Sum". Los mapas de las variables del indicador se presentan en el Anexo.

Tabla 24 Estandarización de la variable 1 del indicadorC1

| susceptibilidad a la erosión | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Atributo | Valoración |
| Muy severa | 4 |
| Severa | 3 |
| Moderada | 2 |
| Baja | 1 |
| No susceptibilidad | 0 |

Fuente: El estudio

Tabla 25 Estandarización de la variable 2 del indicadorC1

| Procesos erosivos dados. | |
|---------------------------------|-------------------|
| Atributo | Valoración |
| Laminar | 3 |
| En surcos | 4 |
| Sin proceso erosivo | 0 |

Fuente: El estudio

El raster se reclasificó para obtener valores números enteros entre 0 y 4

h. Indicador C2, Susceptibilidad a los deslizamientos

Existen zonas que presentan susceptibilidad moderada a alta en el municipio, en el corregimiento de Palermo y en las veredas Marcura, Toibita y el Tejar.

Tabla 26 Estandarización de la variable del indicador C2

| Susceptibilidad a los deslizamientos | |
|---|-------------------|
| Atributo | Valoración |
| Moderada a Alta | 4 |
| Moderada | 3 |
| Sin Amenaza | 0 |

Fuente: El estudio

i. Indicador C3, Cobertura de la tierra, en zonas susceptibles a la erosión o a los deslizamientos

Se considera que las coberturas naturales prestan de forma más eficiente el servicio ecosistémico de protección de los suelos, razón por la que estas se les asignó una calificación mayor que las coberturas seminaturales.

Mapa 6 Estandarización de variables del indicador C3

| Grado de Transformación en zonas susceptibles | Valoración |
|--|-------------------|
| Ecosistema Natural | 4 |
| Ecosistema Seminatural | 2 |
| Ecosistema Transformado | 1 |
| Zonas construidas o de extracción minera | 999 |

Fuente: El estudio

4.2.3 Integración de Indicadores para Generar los criterios

Se realizó la implementación del modelo para cada uno de los criterios, teniendo en cuenta las reglas de decisión, generadas a partir de la agregación de los juicios individuales.

La secuencia de pasos para obtener los criterios se automatizaron mediante la herramienta *model Builder* de ArcGis, (ver Anexo)

a. Criterio A. Servicio ecosistémico de soporte asociado a la biodiversidad

Se realiza el cálculo por los métodos a partir de las reglas de decisión obtenidas

$$A (\text{pares}) = (0.64 * A1) + (0.11 * A2) + (0.25 * A3)$$

b. Criterio B. Servicio ecosistémico de provisión de agua asociado a la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica

$$B (\text{pares}) = (0.31 * B1) + (0.59 * B2) + (0.10 * B3)$$

El flujo de trabajo para el criterio B se automatizó mediante la herramienta *model Builder* de ArcGis, aplicando una sola secuencia de pasos.

c. Criterio C. Servicio ecosistémico de regulación asociado a la prevención de la erosión

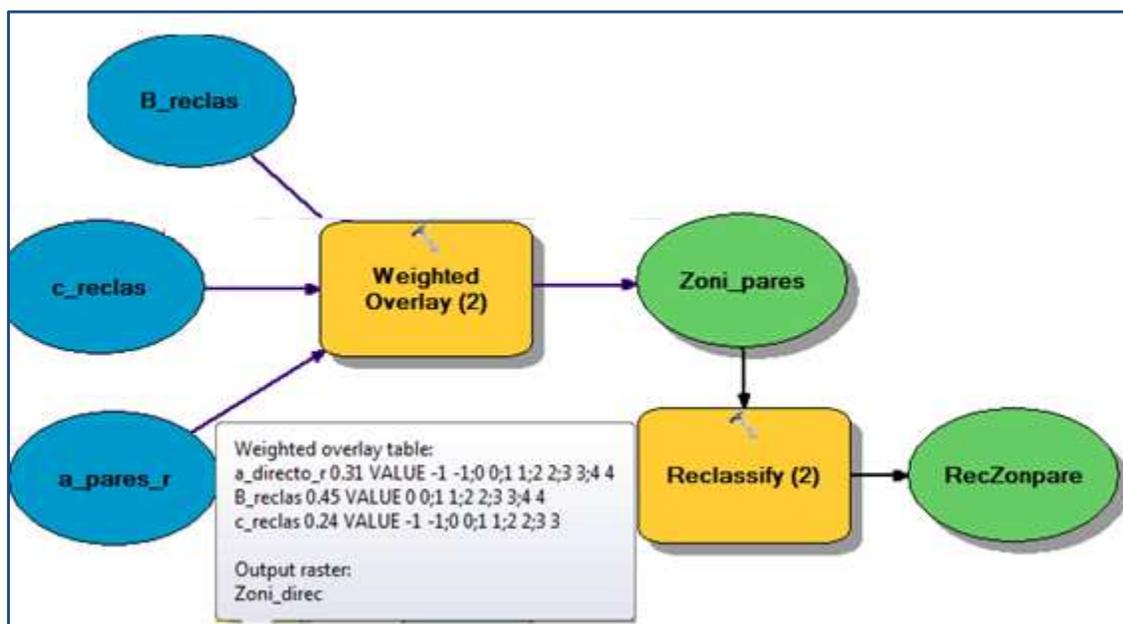
$$C (\text{pares}) = (0.45 * C1) + (0.35 * C2) + (0.20 * C3)$$

4.2.4 Integración de Criterios, Resultados del modelo.

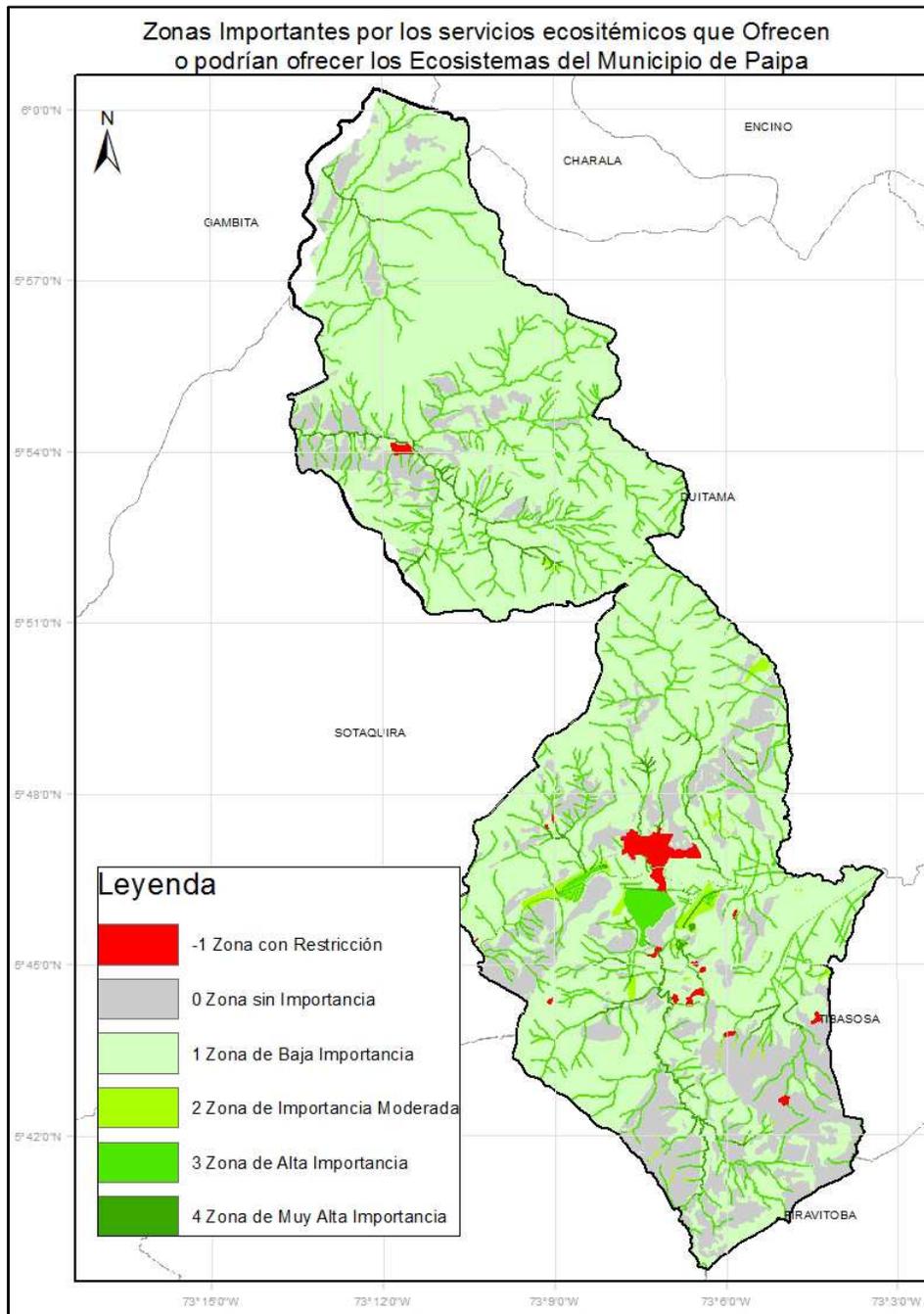
Zonificación por importancia en servicios ecosistémicos

$$ZI_{(\text{Pares})} = 0.31 * A + 0.46 * B + 0.23 * C$$

Ilustración 3 Model Builder Zonificación por los métodos de Pares



.Mapa 7 Mapa de Zonificación por el método de pares de saaty. Agregación de juicios individuales



Fuente: El Estudio

4.3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD Y AJUSTE DEL MODELO

a. Sensibilidad del modelo a los métodos de ponderación de los criterios e indicadores. Sumatoria lineal ponderada

Se realizó una ponderación directa que corresponde al valor identificado por cada uno de los expertos. El valor de los criterios y de los indicadores finales se obtuvo a partir de la media aritmética.

| | |
|--|--|
| $\text{Criterio } X = \frac{(X_1 + \dots + X_n)}{(A_1 + \dots + A_n) + (B_1 + \dots + B_n) + (C_1 + \dots + C_n)}$ | <p>x es el indicador o criterio y n el número de expertos.</p> |
|--|--|

A continuación se presentan los resultados de los juicios de valor, y el ponderado calculado como el promedio para cada indicador

Tabla 27 Valoración de criterios por los expertos por el método de Directo

| Expertos | | | | | | | | | | | |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|-----------|--|
| Criterio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Suma | ponderado | |
| A | 5 | 8 | 6 | 5 | 4 | 7 | 7 | 5 | 47 | 0.31 | |
| B | 9 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 | 9 | 9 | 69 | 0.45 | |
| C | 3 | 5 | 8 | 4 | 2 | 3 | 4 | 7 | 36 | 0.24 | |
| TOTAL (A+B+C) | 17 | 22 | 22 | 18 | 14 | 18 | 20 | 21 | 152 | 1.00 | |

Fuente: El Estudio

De esta forma, se obtuvo la ecuación para generar el mapa de zonas importantes por servicios ecosistémicos por el método directo, los resultados de la calificación para cada indicador se pueden consultar en el anexo, a partir del ponderado de los criterios y de los indicadores se obtuvo la siguiente ecuación:

Ecuación 5 Regla de decisión para la zonificación a partir del método de ponderación directa

$$ZI_{\text{directo}} = [0.31 * \{ (0.467 * A1) + (0.20 * A2) + (0.333 * A3) \}] + [0.45 * \{ (0.357 * B1) + (0.427 * B2) + (0.21 * B3) \}] + [0.24 * \{ (0.383 * C1) + (0.35 * C2) + (0.267 * C3) \}]$$

$$ZI_{\text{directo}} = (0.145 * A1) + (0.62 * A2) + (0.102 * A3) + (0.161 * B1) + (0.192 * B2) + (0.95 * B3) + (0.92 * C1) + (0.84 * C2) + (0.64 * C3).$$

ZI= zonas importantes

A1= Ecosistemas importantes

A2= Grado de Transformación de los ecosistemas

A3= Importancia para la conservación de los ecosistemas

B1= Disponibilidad de agua subterránea

B2= Disponibilidad de agua superficial

B3= Riesgo de perder el servicio ecosistémico de provisión de agua

C1= Susceptibilidad a la erosión

C2= Susceptibilidad a los deslizamientos

C3= Coberturas en las zonas en suelos susceptibles a la erosión y los deslizamientos

Fuente: El estudio

b. Sensibilidad del modelo a los métodos de ponderación de los criterios e indicadores. Tasación simple

Para evaluar el modelo por este método se realizó una nueva encuesta, en la cual se solicitó a los expertos que asignaran un porcentaje de importancia a los criterios y luego al interior de cada criterio, se les pidió asignar el porcentaje de los indicadores.

Tabla 28 Juicios de valor de los expertos y ponderado. Método de Tasación Simple

| Experto \ Criterio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | ponderado de indicadores | ponderado de criterios |
|--------------------|----|----|---|----|----|----|----|----|--------------------------|------------------------|
| A1 | 18 | 10 | 7 | 13 | 18 | 20 | 14 | 15 | 14 | 34.0 % |
| A2 | 8 | 8 | 8 | 5 | 20 | 5 | 7 | 10 | 9 | |

| | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|--------|
| A3 | 10 | 19 | 7 | 11 | 9 | 15 | 5 | 10 | 11 | |
| B1 | 12 | 5 | 8 | 15 | 21 | 11 | 30 | 20 | 15 | 42.6 % |
| B2 | 18 | 25 | 30 | 25 | 11 | 12 | 14 | 15 | 19 | |
| B3 | 5 | 7 | 11 | 10 | 12 | 12 | 9 | 3 | 9 | |
| C1 | 15 | 8 | 11 | 2 | 3 | 7 | 6 | 12 | 8 | 23.4 % |
| C2 | 6 | 13 | 12 | 7 | 3 | 7 | 5 | 10 | 8 | |
| C3 | 8 | 5 | 6 | 12 | 3 | 11 | 10 | 5 | 7 | |
| | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100.00 | 100 % |

Fuente: El Estudio

De acuerdo a los resultados se obtuvo la siguiente ecuación para realizar el análisis de sensibilidad:

Ecuación 6 Ecuación para la zonificación a partir del método de Tasación simple por indicadores.

$$ZI_{\text{Tasación Simple}} = 0,34*A + 0.43*B + 0.23 *C$$

$$ZI_{\text{Tasación Simple}} = (0.14*A1)+(0.9*A2) +(0.11*A3) + (0.15*B1)+(0.19*B2)+(0.9*B3)+(0.8*C1)+(0.8*C2) +(0.7*C3).$$

ZI= zonas importantes

A1= Ecosistemas importantes

A2= Grado de Transformación de los ecosistemas

A3= Importancia para la conservación de los ecosistemas

B1= Disponibilidad de agua subterránea

B2= Disponibilidad de agua superficial

B3= Riesgo de perder el servicio ecosistémico de provisión de agua

C1= Susceptibilidad a la erosión

C2= Susceptibilidad a los deslizamientos

C3= Coberturas en las zonas en suelos susceptibles a la erosión y los deslizamientos

Fuente: El estudio

Debido a que se solicitó a los expertos realizar nuevamente la asignación de valores a la importancia de los servicios ecosistémicos y sus indicadores, se pudo evaluar

que no existe un aumento considerable en la subjetividad del experto al variar la forma en que se solicita realizar la calificación de los criterios.

El indicador en que más se observó variación en su importancia es el Grado de Transformación de los ecosistemas, que al ser calificado en una escala de importancia de 1 a 9 se consideró menos importante que al pedirle al experto que le asignará un porcentaje de importancia.

Tabla 29 Diferencia en el juicio de valor de los expertos

| Indicador | ponderación directa | Tasación Simple |
|-----------|---------------------|-----------------|
| A1 | 0,15 | 0,14 |
| A2 | 0,06 | 0,09 |
| A3 | 0,10 | 0,11 |
| B1 | 0,16 | 0,15 |
| B2 | 0,19 | 0,19 |
| B3 | 0,10 | 0,09 |
| C1 | 0,09 | 0,08 |
| C2 | 0,08 | 0,08 |
| C3 | 0,06 | 0,07 |

c. Evaluación de resultados de Sensibilidad del modelo a los métodos de ponderación

A partir las reglas de decisión por el método de tasación simple y el sumatoria lineal ponderada directa, se generaron los mapas de zonificación que se pueden consultar en el Anexo.

Una primera mirada a las diferencias de los tres mapas obtenidos se da por el número de celdas clasificadas en los diferentes rangos de importancia por servicios

ecosistémicos, siendo muy parecidos los resultados de sumatoria lineal ponderada de forma directa y el de tasación simple, en donde, la gran mayoría de celdas muestran zonas sin importancia o baja importancia, con una escasa representatividad de las zonas de alta o muy alta importancia.

Tabla 30 comparación de resultados por los tres métodos

| VALUE | Descripción | Numero de celdas del Raster | | |
|-----------------|------------------------------|--|------------------------------------|-----------------|
| | | comparación de pares de saaty - agregación de Juicios individuales (AIJ) | sumatoria lineal ponderada Directa | Tasación Simple |
| -1 | Zona con Restricción | 109.935 | 193.598 | 193.598 |
| 0 | Zona sin Importancia | 2.133.868 | 4.363.397 | 3.376.974 |
| 1 | Zona de Baja Importancia | 8.267.625 | 5.547.688 | 6.768.343 |
| 2 | Zona de Importancia Moderada | 97.724 | 1.939.967 | 1.703.554 |
| 3 | Zona de Alta Importancia | 1.279.794 | 9.262 | 11.443 |
| 4 | Zona de Muy Alta Importancia | 164.966 | 0 | 0 |
| TOTAL DE CELDAS | | 12.053.912 | 12.053.912 | 12.053.912 |

La evaluación de la sensibilidad al modelo se realizó a partir de una resta de las capas obtenidas mediante el uso de algebra de mapas, de tal forma que se pudiese apreciar el impacto de la variación de los métodos de ponderación en cada una de las celdas raster entre los métodos de comparación de pares de Saaty y la suma lineal ponderada directa.

Se encontró que tan solo 6.573.480 de celdas no presentaron variación en el resultado, encontrándose variaciones abruptas de celdas que modificaron en tres

valores, (por ejemplo, de ser Zona de Muy Alta Importancia a Zona de Baja Importancia) como se puede observar en la siguiente tabla.

| VALUE | Número de Celdas |
|-------|------------------|
| -3 | 76982 |
| -2 | 538800 |
| -1 | 3559887 |
| 0 | 6573480 |
| 1 | 1304763 |
| TOTAL | 12053912 |

Tabla 31 Resultado de la resta de los raster obtenidos por el Método de pares y el de sumatoria lineal ponderada.

$S = \frac{\text{suma } (X_i \text{ de capa original} - X_i \text{ de capa modificada})}{\text{número de Pixeles } X_i}$

$S = \frac{\text{suma (raster producto del algebra de mapas)}}{\text{número de Pixeles } X_i}$

$S = \frac{(5480432)}{12053912};$

$S = 0,46$

Este índice de diferencia media por pixel está indicando un 46% de variación en los resultados del modelo y el 54% de similitud al modificar el método de ponderación.

| VALUE | Número de Celdas |
|-------|------------------|
| -1 | 481719 |
| 0 | 10336102 |
| 1 | 1236091 |
| TOTAL | 12053912 |

$S = \frac{1717810}{12053912}$

$S = 0,14$

Este índice muestra una variación del 14% y una similitud del 86%

d. Evaluación a partir del radio de consistencia.

Todos los radios de consistencia están por debajo del 5%, por lo que las matrices individuales por expertos y las agregadas son consistentes. Teniendo un radio de

consistencia más bajo las Matrices resultantes de la Agregación de Juicios Individuales por criterios.

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al revisar la literatura acerca del tema de servicios ecosistémicos se encontró una amplia gama de criterios, indicadores y variables que describen la compleja relación entre los ecosistemas y los servicios ambientales que prestan, siendo imposible entender esta realidad a partir de un único criterio, un solo indicador o una sola variable.

Luego, al delimitar esta compleja realidad a la unidad territorial municipal y seleccionar únicamente aquellos servicios ecosistémicos que en Colombia se han incluido en la planificación territorial municipal, nuevamente se encontraron múltiples criterios e indicadores que se deben incorporar para abordar su estudio, más aún si estos se quieren espacializar o identificar las zonas prioritarias para su conservación, haciendo parte sin duda, de una decisión espacial multicriterio.

Los elementos del modelo se definieron en el marco del ordenamiento territorial municipal, en cuanto a la inclusión de los servicios ecosistémicos encontrando, que la conservación de la biodiversidad, la provisión de agua asociado a la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica y el servicio de regulación asociado a la prevención de la erosión son los más representativos para la identificación espacial de zonas homogéneas por su importancia de servicios ecosistémicos y se definieron nueve indicadores, que en su gran mayoría estaban explícitos en las políticas y legislación revisada.

Esta realidad se constató al revisar el plan de ordenamiento territorial del municipio de Paipa, y encontrar insumos cartográficos suficientes para representar estos indicadores y criterios en su totalidad.

En el modelo se identificaron como factores los parámetros que favorecen la prestación del servicio por parte de los ecosistemas y como limitantes aquellos parámetros que los dificultan o lo impiden totalmente, especialmente la transformación total de la cobertura vegetal en zonas urbanas o mineras; logrando, de esta forma, una mirada que integra el uso de la tierra en los procesos ecosistémicos.

Una limitante en la identificación de los elementos del modelo, es que el estudio contempla únicamente el componente espacial de los criterios e indicadores (Taboada y Cotos, 2005) y sus atributos cuantitativos y cualitativos que se pueden espacializar, sin incluir las relaciones que se dan en el interior de los ecosistemas con su capacidad de brindar estos servicios (Balvanera y Colter, 2009).

Se estructuró un modelo jerárquico, que permitió descomponer el problema en sus partes, siendo fácil analizar y entender una realidad compleja, y controlar los cambios en cada una de las partes y sus efectos en el todo tal y como se describió en el capítulo de revisión literaria (Lamazares y Berumen, 2011); siendo entonces, el modelo jerárquico una herramienta metodológica apropiada para entender los servicios que nos prestan los ecosistemas y la comprensión de su distribución espacial.

La consulta se realizó a expertos con homogeneidad en sus estudios de postgrado relacionados directa o indirectamente con la investigación, y/o incorporación en la planeación del tema de servicios ecosistémicos; la metodología propuesta (Aznar & Guijarro, 2012) permitió agregar los juicios individuales de los expertos en una matriz pareada, haciendo más confiable el modelo ya que se obtuvieron más bajos valores en los índices de consistencia de esta matriz agregada que en las matrices individuales de los expertos; aun cuando no es una propuesta metodológica específica para el análisis espacial multicriterio, es necesario incorporarla en la modelación de los criterios, con los cuáles se construye el modelo espacial.

El alcance del estudio no contempló la calificación de los criterios e indicadores por grupos no homogéneos de expertos, qué en una mirada integral del tema de servicios ecosistémicos se necesitaría incluir la visión de múltiples actores sociales (Balvanera y Colter, 2009), por ejemplo, la visión de actores políticos, académicos, comunidad rural, etc; caso en el que es necesario modificar la propuesta metodológica, ya que como se dijo anteriormente solo es aplicable cuando, existe una condición en común de los expertos que genera una visión parecida de la realidad que se quiere evaluar, arrojando puntuaciones de los criterios similares.

Todos los expertos consideraron que en la planificación municipal el criterio más importante es la provisión de agua y al realizar el cálculo de la ponderación de los criterios e indicadores por el método de comparación de pares de saaty, este criterio tomó aún más fuerza, pasando del 45% de importancia por el método directo al 66%;

es decir, que su importancia absoluta se hizo mayor al compararlo con los otros dos servicios ecosistémicos.

La comparación de pares mostró que 6 de 8 expertos tiene una preferencia más fuerte por el servicio asociado a la provisión de agua sobre el Servicio ecosistémico de regulación asociado a la prevención de la erosión, pues en las 6 matrices los valores más altos obtenidos en la escala de comparación están por encima de 5; pero este servicio no presenta la misma importancia cuando se compara con el servicio de biodiversidad en donde su importancia oscila entre 3 y 5. En este sentido ese valor tan alto obtenido por el segundo criterio está determinado por esta preferencia dada sobre el criterio 3.

Las demás comparaciones pareadas que en promedio oscilan entre 2 y 3, con tan solo dos casos que llegaron hasta 5, es decir, que los expertos no muestran preferencias tan marcadas respecto a la importancia de la Biodiversidad frente al de provisión de agua, siendo sin embargo, más importante al compararlo con la prevención de la erosión.

De esta forma, el análisis muestra que la variación en las ponderaciones resultantes de la agregación de los juicios individuales está más influenciada por las comparaciones en donde, los expertos le dan mayor importancia a un criterio sobre otro, en este caso, ese aumento de 45% al 66%, está dado precisamente por su importancia frente a otro criterio.

La ponderación de los indicadores, muestra que los expertos dan importancia intermedia en la comparación por pares, a excepción de dos casos que mostraron preferencias marcadas; la más notoria es en el cálculo del criterio de Biodiversidad en donde, el indicador de ecosistemas importantes tienen una mayor preferencia sobre el indicador del grado de transformación.

Estas matrices pueden ser un insumo a tener en cuenta en la planificación ambiental, por ejemplo, en el municipio de Paipa existen ecosistemas de páramo que han sido altamente transformados y ahora se encuentran en pastizales con uso ganadero; entonces, de acuerdo a las matrices pareadas, estos páramos a pesar de su transformación se deben incluir en la delimitación de zonas claves por servicios ecosistémicos ya que es más importante el tipo de ecosistema que el grado de transformación que ha sufrido.

Al revisar los insumos cartográficos con los que se implementó el modelo se encontró una amplia variedad de leyendas cualitativas, cuantitativas, de rangos diferentes y escalas no comparables, por lo que fue necesario en todos los casos realizar un proceso de estandarización; en algunos casos se encontró dificultad en la comprensión que estas variables tenían, requiriendo el acompañamiento de expertos claves para su valoración.

De acuerdo a los referentes teóricos consultados, en la propuesta metodológica no se incluyó la participación de los expertos durante la fase de estandarización, sin embargo, los resultados de la implementación evidencian la necesidad de incluir

esta consulta a los respectivos temáticos, durante esta etapa del análisis espacial multicriterio.

Todos los procesos requeridos en la implementación del modelo fue posible llevarlos a cabo en ArcGis ® (Sendra *et al*, 2008); la herramienta “*Model Builder*” facilitó la organización y revisión constante de los flujos de trabajo y permitió tener control de los parámetros de entrada, especialmente los que se incluyen de forma manual y disminuyó el tiempo en las secuencias que se repetían para los diferentes indicadores y criterios, ofreciendo un ambiente gráfico que además fortaleció la documentación de los procesos. De esta forma, el resultado obtenido fue el esperado, de acuerdo a la revisión de literatura realizada y la metodología propuesta.

Las herramientas Weighted Sum y Weighted overlay permitieron el ingreso únicamente de la regla de decisión y obtener las alternativas, sin embargo, el Software no cuenta con una herramienta que permita realizar la comparación por pares, ni seguir el proceso de análisis Jerárquico AHP; estas labores se deben realizar de forma manual o con ayuda de otros software.

El cálculo de las matrices, vectores propios, radios de consistencia, y la agregación de estos juicios en otra matriz, requiere una inversión de tiempo considerable, que se incrementa según la complejidad del modelo, por ejemplo, al aumentar el número de expertos, criterios o indicadores a tener en cuenta, aspecto que se debe tener en cuenta en la planificación de los estudios que incluyen el uso de análisis espacial multicriterio.

El análisis de sensibilidad, último proceso en el análisis espacial multicriterio, permitió establecer que el modelo es sensible al método de ponderación utilizado, dado que el índice de diferencia media por pixel presentó 46% de variación entre el método de comparación de pares de Saaty y el método de suma lineal ponderada directa; considerando más confiable el método de comparación de pares, con el cual se realizó la zonificación por servicios ecosistémicos del municipio.

6 CONCLUSIONES

- El análisis espacial multicriterio es una herramienta factible de utilizar en el estudio de los servicios ecosistémicos, dado que es indispensable la inclusión de múltiples criterios e indicadores para modelar esta compleja realidad.
- El proceso de análisis Jerárquico AHP es una herramienta metodológica apropiada en la zonificación de áreas importantes por los servicios ecosistémicos, ya que permite desglosar esa realidad en sus partes, analizarla, entenderla para luego, consolidarla en una sola unidad.
- Los criterios del modelo se definieron de acuerdo a los servicios ecosistémicos presentes en la planificación ambiental municipal, Servicio ecosistémico de soporte asociado a la biodiversidad y provisión de agua y 9 indicadores, características básicas de estos.
- Como Ingeniera forestal estoy convencida que las propuestas de conservación de los ecosistemas no pueden estar desarticuladas de la sociedad, no solo porque para sobrevivir o para tener una vida digna o incluso una vida con calidad dependemos de los servicios que nos ofrecen los ecosistemas; sino también porque somos nosotros, los humanos quienes, con nuestra forma de vivir, hemos ocasionado el daño, que resumimos en frases como: “problemática ambiental mundial”, “pérdida de la biodiversidad”, “deforestación global acelerada”, entre otras muchas. El concepto de “servicios ecosistémicos” permite entender esta estrecha relación a sociedad-ecosistemas a nivel local.

- Los resultados permitieron delimitar las zonas con Restricción, Zonas sin Importancia, Zonas de Baja Importancia, Zonas de Importancia Moderada, Zonas de Alta Importancia y Zonas de Muy Alta Importancia; encontrando que en el municipio el 12% del territorio municipal tiene alta y muy alta importancia por el servicio actual o potencial que ofertan sus ecosistemas; siendo estas zonas en donde se recomienda implementar de forma prioritaria los instrumentos de planificación ambiental municipal para la disminución de la presión sobre los ecosistemas y la degradación ambiental y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población de Paipa.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Alteso, A., Barral, M., Booman, L., Carreño, L. (2011). Servicios Ecosistémicos: Un marco conceptual en construcción. Aspectos conceptuales y operativos. En Laterra, P., Joggagy, G., Paruelo, J. (Ed). *Valoración de servicios Ecosistémicos, Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. (pp. 645-658). Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA.
- Aznar, B. y Guijarro, F. (2012). *Nuevos métodos de valoración: Modelos Multicriterio* (2ª ed). Valencia: Universidad Politécnica.
- Balvanera, P., Castillo, A., Lazos, E., et al. (2010). Marcos conceptuales interdisciplinarios para el estudio de los servicios ecosistémicos en América Latina. En Laterra, P., Joggagy, G., Paruelo, J. (Ed). *Valoración de servicios Ecosistémicos, Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. (pp. 39-68). Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA.
- Balvanera, P., Cotler, H. (2009). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. Gaceta Ecológica Número especial 84 y 85. México: Editorial: D - Instituto Nacional de Ecología.
- Bayon, R. (Febrero de 2007) *Hacer que funcionen los mercados ambientales: lecciones de la experiencia inicial con el azufre, el carbono, los humedales y otros mercados relacionados*. En Ortega, C (Ed). Reconocimiento de los servicios ambientales una oportunidad para la gestión de los recursos naturales en Colombia, Memorias Taller Nacional Ambiental (pp. 13-30). Bogotá, D.C.: Ecoprint.
- Camargo, L. (2011). *Plan de Desarrollo Municipal: Paipa "Rumbo a la transformación" 2012-2015*. Paipa: Alcaldía Municipal de Paipa.
- Colombia, Congreso de la República. (16 de junio de 2011). Ley 1450 de 2011. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014. *Diario Oficial No. 48.102*. Bogotá, D.C.

Colombia, Congreso de la República. (18 de julio de 1997). Ley 388 de 1997. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial No. 43.091*. Bogotá, D.C.

Colombia, Congreso de la República. (22 de diciembre de 1993). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se ordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial No. 41.146*. Bogotá, D.C.

Colombia, Departamento Nacional de Planeación DNP. (2011). *Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014: Prosperidad para todos*. Bogotá, D.C.: DNP

Colombia, Presidencia de la República. (17 de mayo de 2013). Decreto 0953 de 2013. Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 modificado por el artículo 210 de la ley 1450 de 2011. *Diario Oficial No. 48.793*. Bogotá, D.C.

Colombia, Presidencia de la República. (20 de septiembre de 2007). Decreto 3600 de 2007. Por el cual se reglamentan las disposiciones de las leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a determinantes del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones. *Diario Oficial No. 46.757*. Bogotá, D.C.

Corpoboyaca - Corporación Autónoma Regional de Boyacá (13 de Septiembre de 2011). Resolución 2727 de 2011. Por medio de la cual se establecen las determinantes ambientales para la formulación, revisión o modificación de los planes de ordenamiento territorial municipal en la jurisdicción de Corpoboyaca y se toman otras determinaciones.

Corpoboyacá, UPTC, Universidad Nacional de Colombia. (31 de julio de 2006). *Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la cuenca alta del río Chicamocha*. Tunja. Recuperado de <http://www.corpoboyaca.gov.co/index.php/en/nuestro-gestion/plan-de-ordenacion-y-manejo-de-cuencas/item/281-pomca-cuenca-alta-del-rio-chicamocha>

Domínguez, A., Quintanilla, A., Rodríguez, A. (2004). Gestión del turismo rural de la sierra Alcaraz y campo de Montiel mediante técnicas multicriterio y la utilización de SIG. En C. García, Y. Álvarez, M. Rogel, G. Pérez. *El empleo de los SIG y*

la teledetección en planificación territorial. (p. 511). España: Universidad de Murcia.

Ferrer, G., Roca, F., Gual, M. (2012). Servicios Ecosistémicos: ¿Una herramienta útil para la protección o para la mercantilización de la naturaleza?. En *Memorias: XIII Jornadas de Economía crítica, los costes de la crisis y alternativas en construcción.* Recuperado de <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/ec/jec13/Ponencias/economia%20ecologica%20y%20medio%20ambiente/SERVICIOS%20ECOSISTEMICOS.pdf>.

García, M. (2009). Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing” (Tesis doctoral). Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos.

Gómez, M. y Barredo, J. I., (2006). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio* (2ª ed). Madrid: Ra-Ma.

González, B. (2011). *Identificación espacial de áreas prioritarias para el pago por servicios ambientales (PSA) hidrológicos y derivados de la conservación de la biodiversidad en la Sierra Madre Oriental* (Tesis de maestría en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales). Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM. (2011). *Proceso metodológico y aplicación para la definición de la estructura ecológica nacional: énfasis en servicios ecosistémicos Escala 1:500.000.* Bogotá, D.C.: IDEAM

Llamazares, F y Berumen S. (2011) *Los Métodos De Decisión Multicriterio y su aplicación al Análisis del Desarrollo Local* (1ª ed). Madrid: Gráficas Dehon.

Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria decision analysis.* New york: John Wiley & Sons.

Márquez, G. (2002). Ecosistemas estratégicos, bienestar y desarrollo. En Osorio, L., Márquez, G., Mesa, G., Rodríguez, G (Eds). *Educación para la gestión ambiental: una experiencia con los funcionarios del sistema nacional ambiental*

en la Sierra Nevada de Santa Marta. (pp. 103-115). Bogotá, D.C.: Ministerio del Medio Ambiente.

Millennium Ecosystem Assessment - MA. (2005). Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Recuperado de <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>

Millennium Ecosystem Assessment - MA. (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.* Washington D.C.: Island Press.

Moira, L. Achinelli, Ruth A. Perucca y Héctor D. Ligier. (2010). Evaluación multicriterio para la zonificación del servicio ecosistémico en el macrosistema ibérica: amortiguación hídrica. En Laterra, P., Jobbagy, E., Paruelo, J. *Valoración de servicios Ecosistémicos, Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (p. 484). Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA.

Oran, J.P., Gómez, M., Plata, W. (2011). Posibilidades de aplicación de un análisis de sensibilidad secuencial a un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio. La innovación geotecnológica como soporte para la toma de decisiones en el desarrollo territorial. XIII Conferencia Iberoamericana en Sistemas de Información Geográfica (ISBN: 978-607-00-4387-1). Toluca, México: Servicio de Publicaciones de la Universidad Autónoma del Estado de México. Recuperado de www.inegi.org.mx/eventos/2011/conf_ibero/doc/ET4_18_ORAN.pdf.

Pacheco, J.F. Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos.* Serie 58. Santiago de Chile: Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES).

Quétié, F., Tapella, E. (2007). *Servicios ecosistémicos y actores sociales: Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario.* Gaceta ecológica Número especial 84 y 85 p 17 – 26. México: Editorial: D - Instituto Nacional de Ecología.

Sendra, J.B., Gómez, M., López, V. (2008). *Flexibilidad de los SIG para asistir a la toma de decisiones espaciales.* Madrid: Universidad de Alcalá.

Taboada, J.; Cotos, J.M. (2005). *Sistemas de información medio ambiental.* España: Gesbiblo.

- Villota, H. (1992). *El sistema CIAF de clasificación fisiográfica del terreno*. Revista CIAF (Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica), 13(1), 55-70. Bogotá, D.C.
- UNEP-WCMC.(2011). *Developing ecosystem service indicators: Experiences and lessons learned from sub-global assessments and other initiatives*. Montréal, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Recuperado de <http://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-58-en.pdf>.
- Veron, S., Jobbagy, E., Gasparry, I. Kandus, P, et al. (2010). Complejidad de los servicios ecosistémicos y estrategias para abordarla. En *Valoración de servicios Ecosistémicos, Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. (pp. 659-671). Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA.
- Zuñiga, H. (2011). Organización ambiental del territorio, *bienes y servicios ambientales en los instrumentos básicos de planificación municipal*. Diplomado llevado a cabo a través del convenio interinstitucional contraloría de Cundinamarca, Bogotá, D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de <http://comunidad.udistrital.edu.co/hzuniga/files/2012/06/Memorias-Diplomado.pdf>.

8 ANEXOS

I. ANEXO CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

a. Anexo Ponderación por el método Sumatoria lineal ponderada

Tabla 32 Valoración de Criterios por el método de ponderación directa.

| Expertos | | | | | | | | | | | |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|------|-----------|--|
| Criterio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Suma | ponderado | |
| A | 5 | 8 | 6 | 5 | 4 | 7 | 7 | 5 | 47 | 0.31 | |
| B | 9 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 | 9 | 9 | 69 | 0.45 | |
| C | 3 | 5 | 8 | 4 | 2 | 3 | 4 | 7 | 36 | 0.24 | |
| TOTAL | | | | | | | | | 152 | 1.00 | |

Tabla 33 Valoración de indicadores por el método de ponderación directa

| Experto | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-----------|--|
| Indicador | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Suma | ponderado | |
| A1 | 9 | 7 | 9 | 8 | 9 | 6 | 8 | 7 | 63.0 | 46.7 | |
| A2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 2 | 4 | 27.0 | 20.0 | |
| A3 | 5 | 6 | 8 | 7 | 3 | 4 | 5 | 7 | 45.0 | 33.3 | |
| TOTAL | | | | | | | | | 135.0 | 100.0 | |
| B1 | 5 | 7 | 6 | 8 | 9 | 6 | 8 | 7 | 56.0 | 35.7 | |
| B2 | 8 | 9 | 7 | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 67.0 | 42.7 | |
| B3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 4 | 3 | 34.0 | 21.6 | |
| TOTAL | | | | | | | | | 157.0 | 100.0 | |
| C1 | 6.00 | 7.00 | 5.00 | 7.00 | 6.00 | 5.00 | 6.00 | 4.00 | 46.0 | 38.3 | |
| C2 | 6.00 | 7.00 | 4.00 | 5.00 | 3.00 | 7.00 | 5.00 | 5.00 | 42.0 | 35.0 | |
| C3 | 2.00 | 5.00 | 6.00 | 3.00 | 4.00 | 3.00 | 5.00 | 4.00 | 32.0 | 26.7 | |
| TOTAL | | | | | | | | | 120.0 | 100.0 | |

b. Anexo Ponderaciones por pares de Saaty

1. Matrices de comparación pareada de los criterios por experto

Criterio A **Servicio ecosistémico de soporte asociado a la biodiversidad**

Criterio B Servicio ecosistémico de provisión de agua asociado a la protección de zonas estratégicas para la conservación hídrica

Criterio C Servicio ecosistémico de regulación asociado a la prevención de la erosión.

| | | | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|---------------|------------------|------------|------------|------------|---------------|
| Experto 1 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO | Experto 2 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
| Criterio A | 1 | 1/5 | 3 | 0.1830 | Criterio A | 1 | 1/2 | 4 | 0.3331 |
| Criterio B | 5 | 1 | 8 | 0.7418 | Criterio B | 2 | 1 | 5 | 0.5695 |
| Criterio C | 1/3 | 1/8 | 1 | 0.0752 | Criterio C | 1/4 | 1/5 | 1 | 0.0974 |
| CR | 4.28% | < 5% | | 1.0000 | CR | 2.37% | < 5% | | 1.0000 |
| Experto 3 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO | Experto 4 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
| Criterio A | 1 | 1/3 | 1/3 | 0.1429 | Criterio A | 1 | 1/5 | 2 | 0.1721 |
| Criterio B | 3 | 1 | 1 | 0.4286 | Criterio B | 5 | 1 | 6 | 0.7258 |
| Criterio C | 3 | 1 | 1 | 0.4286 | Criterio C | 1/2 | 1/6 | 1 | 0.1020 |
| CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 | CR | 2.81% | < 5% | | 1.0000 |
| Experto 5 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO | Experto 6 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
| Criterio A | 1 | 1/5 | 3 | 0.1830 | Criterio A | 1 | 1/2 | 5 | 0.3420 |
| Criterio B | 5 | 1 | 8 | 0.7418 | Criterio B | 2 | 1 | 6 | 0.5769 |
| Criterio C | 1/3 | 1/8 | 1 | 0.0752 | Criterio C | 1/5 | 1/6 | 1 | 0.0811 |

| | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|---------------|--|------------------|------------|------------|------------|---------------|--|
| CR | 4.28% | < 5% | | 1.0000 | | CR | 2.80% | < 5% | | 1.0000 | |
| Experto 7 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO | | Experto 8 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO | |
| Criterio A | 1 | 1/3 | 3 | 0.2499 | | Criterio A | 1 | 1/5 | 1/3 | 0.1047 | |
| Criterio B | 3 | 1 | 6 | 0.6548 | | Criterio B | 5 | 1 | 3 | 0.6370 | |
| Criterio C | 1/3 | 1/6 | 1 | 0.0953 | | Criterio C | 3 | 1/3 | 1 | 0.2583 | |
| CR | 1.76% | < 5% | | 1.0000 | | CR | 3.72% | < 5% | | 1.0000 | |

2. Matrices de comparación pareada de los indicadores del criterio A por experto

| | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|------|-----|---------------|--|------------------|-------|------|-----|---------------|--|
| Experto 1 | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO | | Experto 2 | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO | |
| A1 | 1 | 8 | 5 | 0.7418 | | A1 | 1 | 5 | 2 | 0.5695 | |
| A2 | 1/8 | 1 | 1/3 | 0.0752 | | A2 | 1/5 | 1 | 1/4 | 0.0974 | |
| A3 | 1/5 | 3 | 1 | 0.1830 | | A3 | 1/2 | 4 | 1 | 0.3331 | |
| CR | 4.28% | < 5% | | 1.0000 | | CR | 2.37% | < 5% | | 1.0000 | |
| Experto 3 | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO | | Experto 4 | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO | |
| A1 | 1 | 6 | 2 | 0.5769 | | A1 | 1 | 6 | 2 | 0.5769 | |
| A2 | 1/6 | 1 | 1/5 | 0.0811 | | A2 | 1/6 | 1 | 1/5 | 0.0811 | |
| A3 | 1/2 | 5 | 1 | 0.3420 | | A3 | 1/2 | 5 | 1 | 0.3420 | |
| CR | 2.80% | < 5% | | 1.0000 | | CR | 2.80% | < 5% | | 1.0000 | |
| Experto 5 | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO | | Experto 6 | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO | |
| A1 | 1 | 5 | 8 | 0.7418 | | A1 | 1 | 3 | 3 | 0.6000 | |
| A2 | 1/5 | 1 | 3 | 0.1830 | | A2 | 1/3 | 1 | 1 | 0.2000 | |
| A3 | 1/8 | 1/3 | 1 | 0.0752 | | A3 | 1/3 | 1 | 1 | 0.2000 | |
| CR | 4.28% | < 5% | | 1.0000 | | CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 | |
| Experto 7 | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO | | Experto 8 | A1 | A2 | A3 | VECTOR PROPIO | |

| | | | | | | | | | |
|----|-------|------|-----|--------|----|-------|------|-----|--------|
| A1 | 1 | 7 | 4 | 0.7049 | A1 | 1 | 4 | 1 | 0.4444 |
| A2 | 1/7 | 1 | 1/3 | 0.0841 | A2 | 1/4 | 1 | 1/4 | 0.1111 |
| A3 | 1/4 | 3 | 1 | 0.2109 | A3 | 1 | 4 | 1 | 0.4444 |
| CR | 3.13% | < 5% | | 1.0000 | CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 |

3. Matrices de calificación de indicadores del criterio B por experto

| | | | | | | | | | |
|------------------|-------|------|----|---------------|------------------|-------|------|----|---------------|
| Experto 1 | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO | Experto 2 | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO |
| B1 | 1 | 1/4 | 2 | 0.1998 | B1 | 1 | 1/3 | 3 | 0.2583 |
| B2 | 4 | 1 | 5 | 0.6833 | B2 | 3 | 1 | 5 | 0.6370 |
| B3 | 1/2 | 1/5 | 1 | 0.1168 | B3 | 1/3 | 1/5 | 1 | 0.1047 |
| CR | 2.38% | < 5% | | 1.0000 | CR | 3.72% | < 5% | | 1.0000 |
| Experto 3 | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO | Experto 4 | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO |
| B1 | 1 | 1/2 | 4 | 0.3331 | B1 | 1 | 1 | 5 | 0.4545 |
| B2 | 2 | 1 | 5 | 0.5695 | B2 | 1 | 1 | 5 | 0.4545 |
| B3 | 1/4 | 1/5 | 1 | 0.0974 | B3 | 1/5 | 1/5 | 1 | 0.0909 |
| CR | 2.37% | < 5% | | 1.0000 | CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 |
| Experto 5 | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO | Experto 6 | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO |
| B1 | 1 | 1 | 5 | 0.4545 | B1 | 1 | 1/3 | 1 | 0.2000 |
| B2 | 1 | 1 | 5 | 0.4545 | B2 | 3 | 1 | 3 | 0.6000 |
| B3 | 1/5 | 1/5 | 1 | 0.0909 | B3 | 1 | 1/3 | 1 | 0.2000 |
| CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 | CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 |
| Experto 7 | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO | Experto 8 | B1 | B2 | B3 | VECTOR PROPIO |

| | | | | | | | | | |
|----|-------|------|---|--------|----|-------|------|---|--------|
| B1 | 1 | 1/2 | 5 | 0.3420 | B1 | 1 | 1/3 | 5 | 0.2718 |
| B2 | 2 | 1 | 6 | 0.5769 | B2 | 3 | 1 | 8 | 0.6612 |
| B3 | 1/5 | 1/6 | 1 | 0.0811 | B3 | 1/5 | 1/8 | 1 | 0.0670 |
| CR | 2.80% | < 5% | | 1.0000 | CR | 4.27% | < 5% | | 1.0000 |

4. Matriz de calificación de indicadores del criterio C por experto

| | | | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|---------------|------------------|------------|------------|------------|---------------|
| Experto 1 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO | Experto 2 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
| Criterio A | 1 | 1 | 5 | 0.4545 | Criterio A | 1 | 1 | 3 | 0.4286 |
| Criterio B | 1 | 1 | 5 | 0.4545 | Criterio B | 1 | 1 | 3 | 0.4286 |
| Criterio C | 1/5 | 1/5 | 1 | 0.0909 | Criterio C | 1/3 | 1/3 | 1 | 0.1429 |
| CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 | CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 |
| Experto 3 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO | Experto 4 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
| Criterio A | 1 | 2 | 1/2 | 0.2970 | Criterio A | 1 | 3 | 5 | 0.6370 |
| Criterio B | 1/2 | 1 | 1/3 | 0.1634 | Criterio B | 1/3 | 1 | 3 | 0.2583 |
| Criterio C | 2 | 3 | 1 | 0.5396 | Criterio C | 1/5 | 1/3 | 1 | 0.1047 |
| CR | 0.89% | < 5% | | 1.0000 | CR | 3.72% | < 5% | | 1.0000 |
| Experto 5 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO | Experto 6 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
| Criterio A | 1 | 4 | 3 | 0.6250 | Criterio A | 1 | 1/3 | 3 | 0.2583 |
| Criterio B | 1/4 | 1 | 1/2 | 0.1365 | Criterio B | 3 | 1 | 5 | 0.6370 |
| Criterio C | 1/3 | 2 | 1 | 0.2385 | Criterio C | 1/3 | 1/5 | 1 | 0.1047 |
| CR | 1.76% | < 5% | | 1.0000 | CR | 3.72% | < 5% | | 1.0000 |

| Experto 7 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
|------------|------------|------------|------------|---------------|
| Criterio A | 1 | 2 | 2 | 0.5000 |
| Criterio B | 1/2 | 1 | 1 | 0.2500 |
| Criterio C | 1/2 | 1 | 1 | 0.2500 |
| CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 |

| Experto 8 | Criterio A | Criterio B | Criterio C | VECTOR PROPIO |
|------------|------------|------------|------------|---------------|
| Criterio A | 1 | 1/2 | 1 | 0.2500 |
| Criterio B | 2 | 1 | 2 | 0.5000 |
| Criterio C | 1 | 1/2 | 1 | 0.2500 |
| CR | 0.00% | < 5% | | 1.0000 |

II. ANEXO PREPARACIÓN DE LOS DATOS

a. Información cartográfica seleccionada para la elaboración de mapas temáticos por servicio ecosistémico

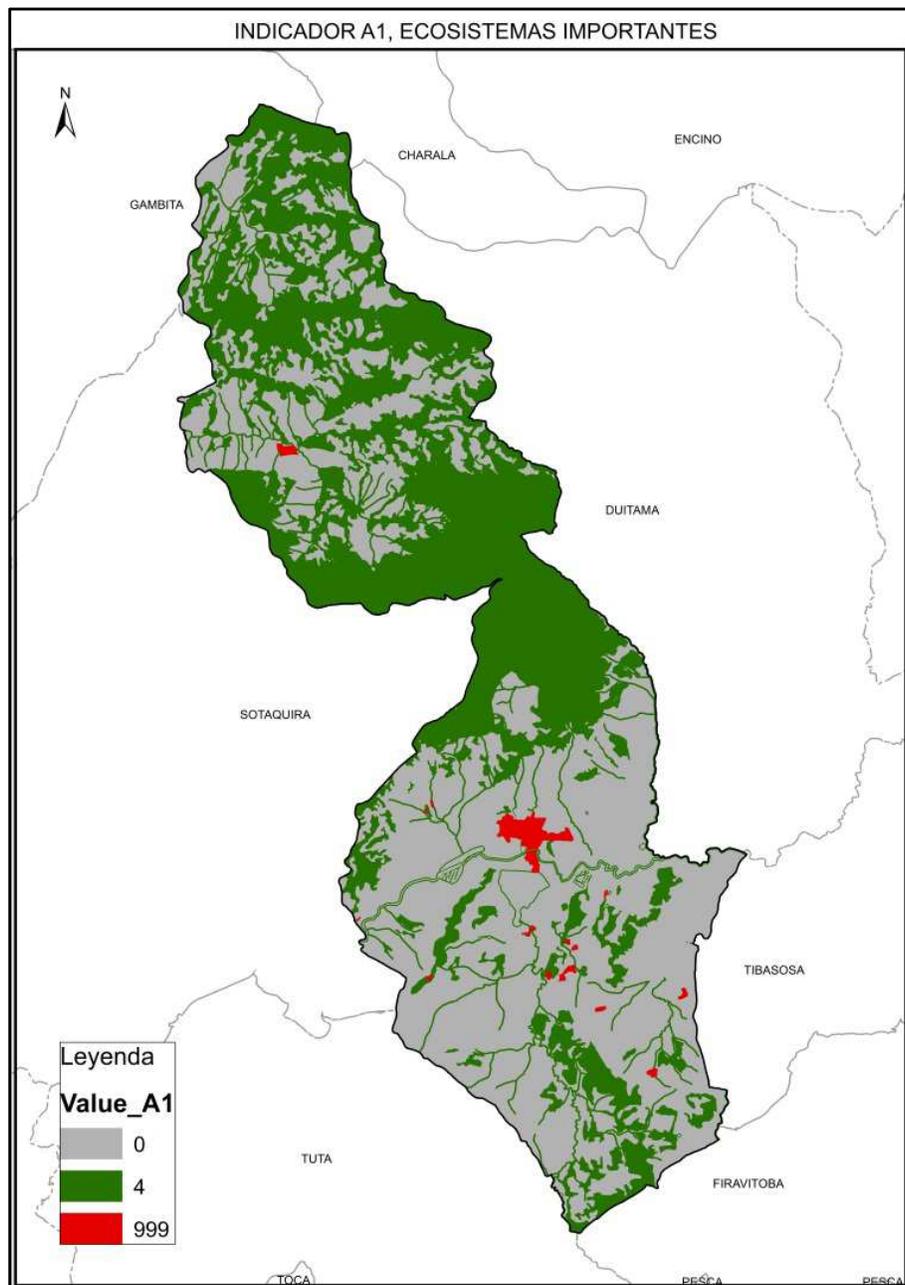
| Código variable | Atributos de la capa | insumo | Autor | Escala | fecha | método |
|-----------------|--|---|--|----------|-------|---|
| A11 | paramos | Atlas de Páramos de Colombia | Instituto Alexander von Humboldt, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible | 1:100000 | 2013 | Selección y agregación |
| | Bosques alto andino y Vegetación de paramo | Cobertura de la tierra | IGAC | 1:25000 | 2000 | |
| | Rondas hídricas y áreas protegidas | Ecosistemas Estratégicos | IGAC | 1:25000 | 2000 | |
| A21 | cobertura | Cobertura de la tierra | IGAC | 1:25000 | 2000 | Clasificación de acuerdo a IDEAM, 2011 |
| A32 | Uso y cobertura de la tierra | mapa de uso y cobertura corine land cover | IDEAM, IGAC, CORMAGD ALENA | 1:100000 | 2006 | Intersección de las dos capas para el Departamento de |

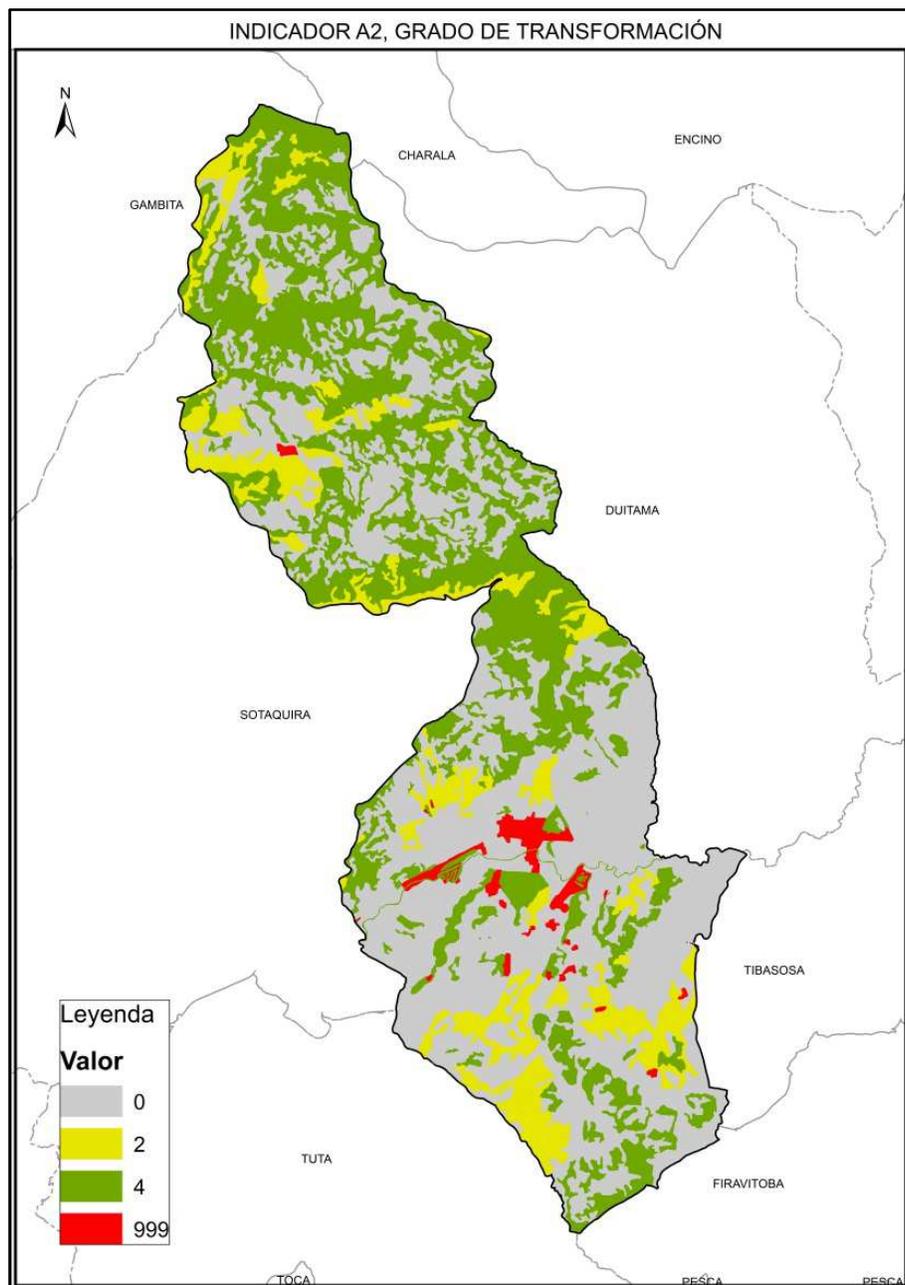
| Código variable | Atributos de la capa | insumo | Autor | Escala | fecha | método |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------|---|
| | Ecosistemas | Mapa de Ecosistemas | IDEAM | 1:500000 | 2006 | Boyacá y cálculos de áreas |
| B11 | Potencial Hidrogeológico | Mapa de Hidrogeología | IGAC | 1:25000 | 2000 | Clasificación directa |
| B21 | Humedales | humedales | IGAC | 1:25000 | 2000 | Clasificación directa |
| B21 | Drenajes y cuerpos de agua | Cartografía básica | IGAC | 1:25000 | 2000 | Buffer Clasificación directa |
| B22 | cobertura | Cobertura de la tierra | IGAC | 1:25000 | 2000 | Clasificación de acuerdo a IDEAM, 2011 (naturales) |
| B31 | grado de conflicto | Conflicto de uso del suelo rural | IGAC | 1:25000 | 2000 | Clasificación directa |
| B32 | Mina | Mina | Alcaldía Municipal | Levantamiento o GPS de las minas | 2011 | Buffer y clasificación |
| C11 | Erosión | Susceptibilidad a la erosión | IGAC | 1:25000 | 2000 | Clasificación directa |
| C12 | Tipo Erosión | Erosión | IGAC | 1:25000 | 2000 | Buffer Clasificación directa |
| C21 | amenaza | Susceptibilidad a los deslizamientos | IGAC | 1:25000 | 2000 | Clasificación directa |
| C31 | cobertura | Cobertura de la tierra | IGAC | 1:25000 | 2000 | Intersección y Clasificación de acuerdo a IDEAM, 2011 (naturales) |

Fuente: El Estudio.

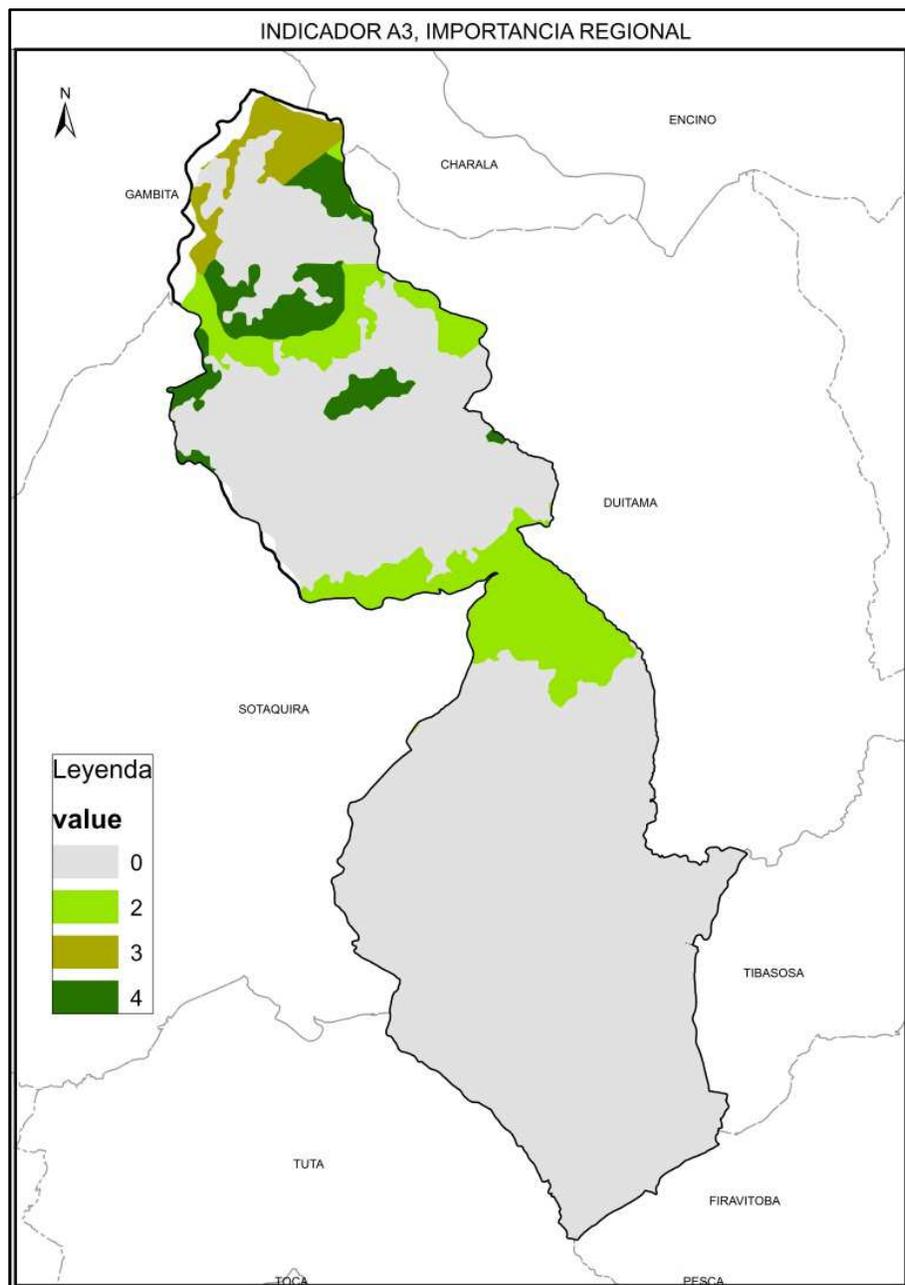
III. ANEXO 4 Mapas de los indicadores

a. Mapa del indicador A1

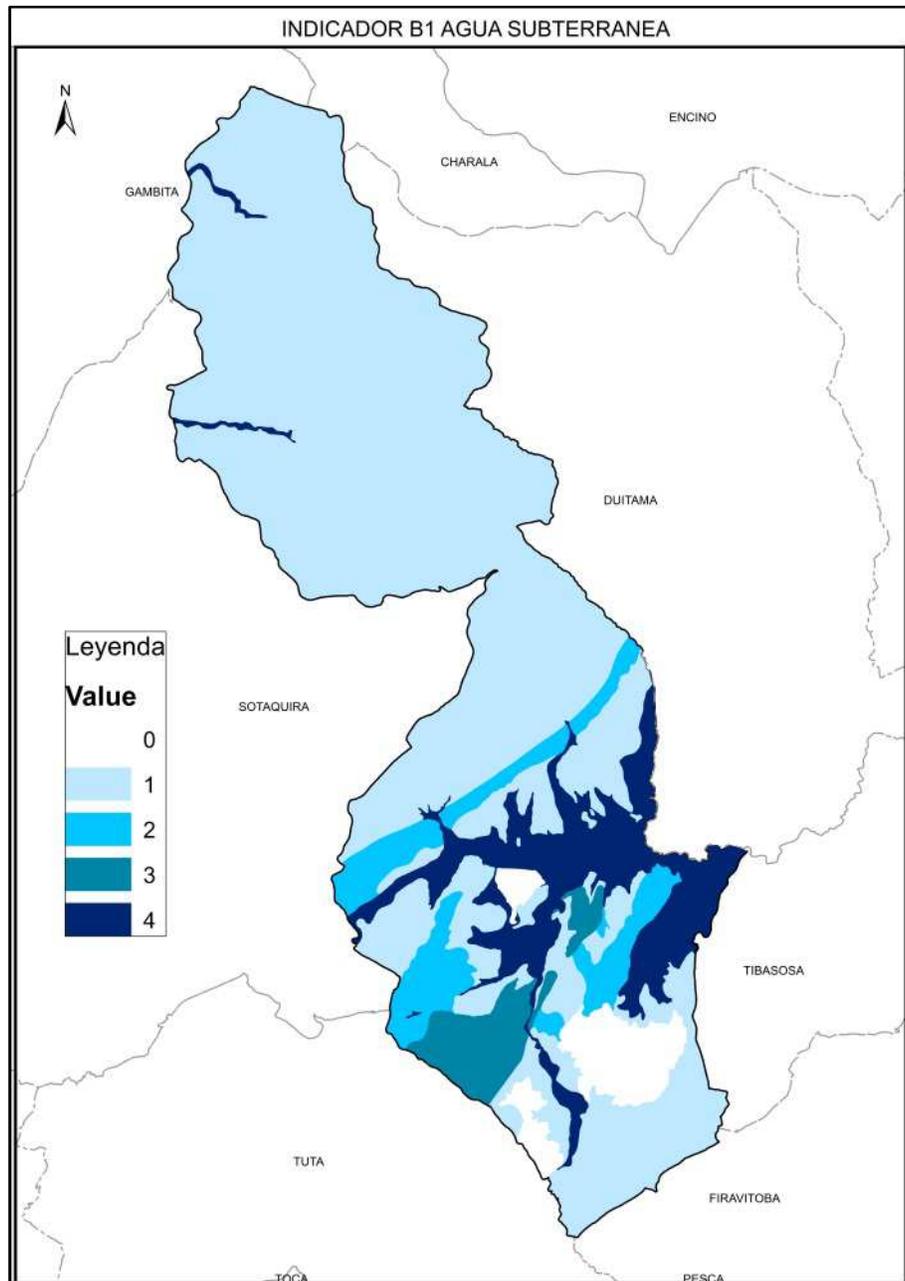


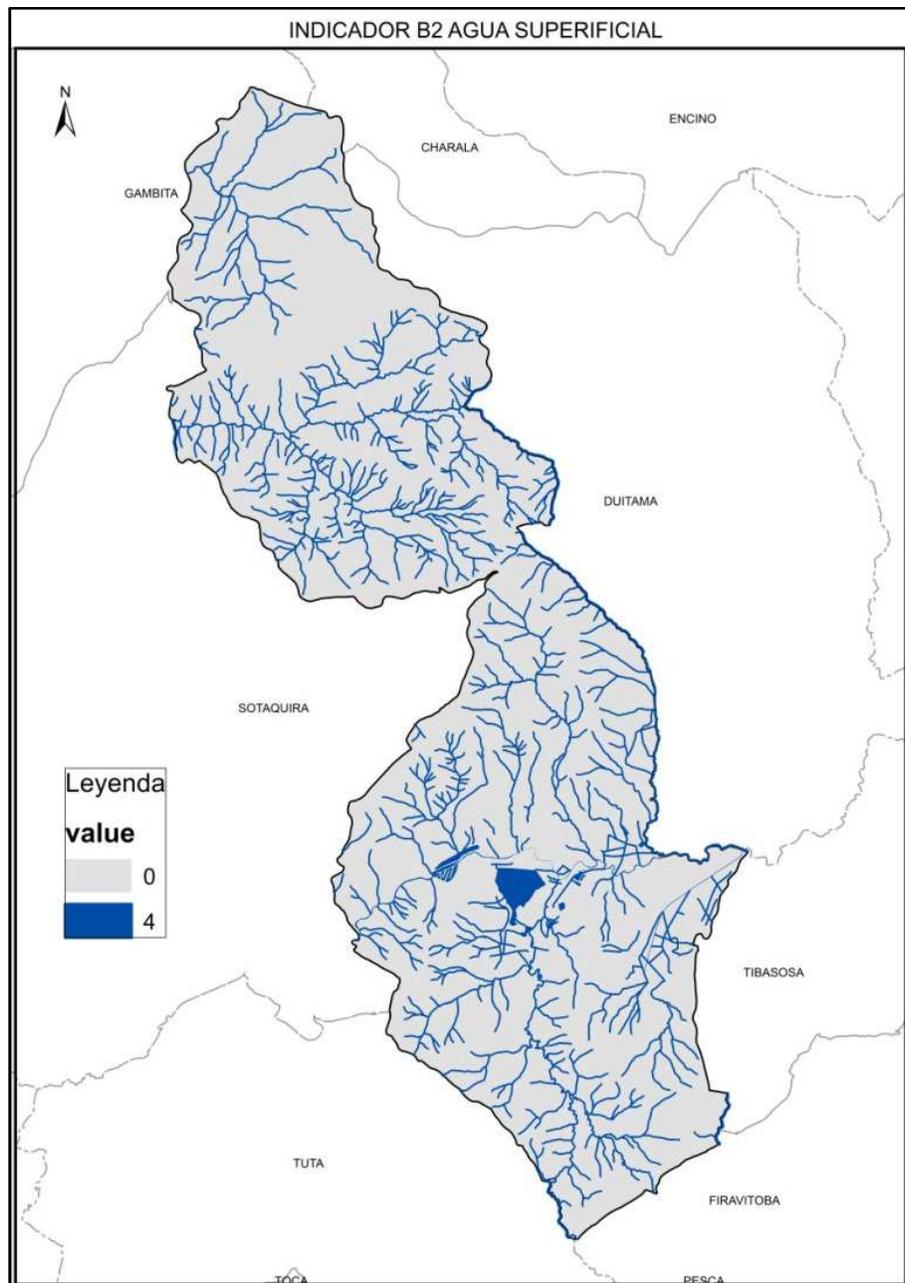
b. Mapa del indicador A2

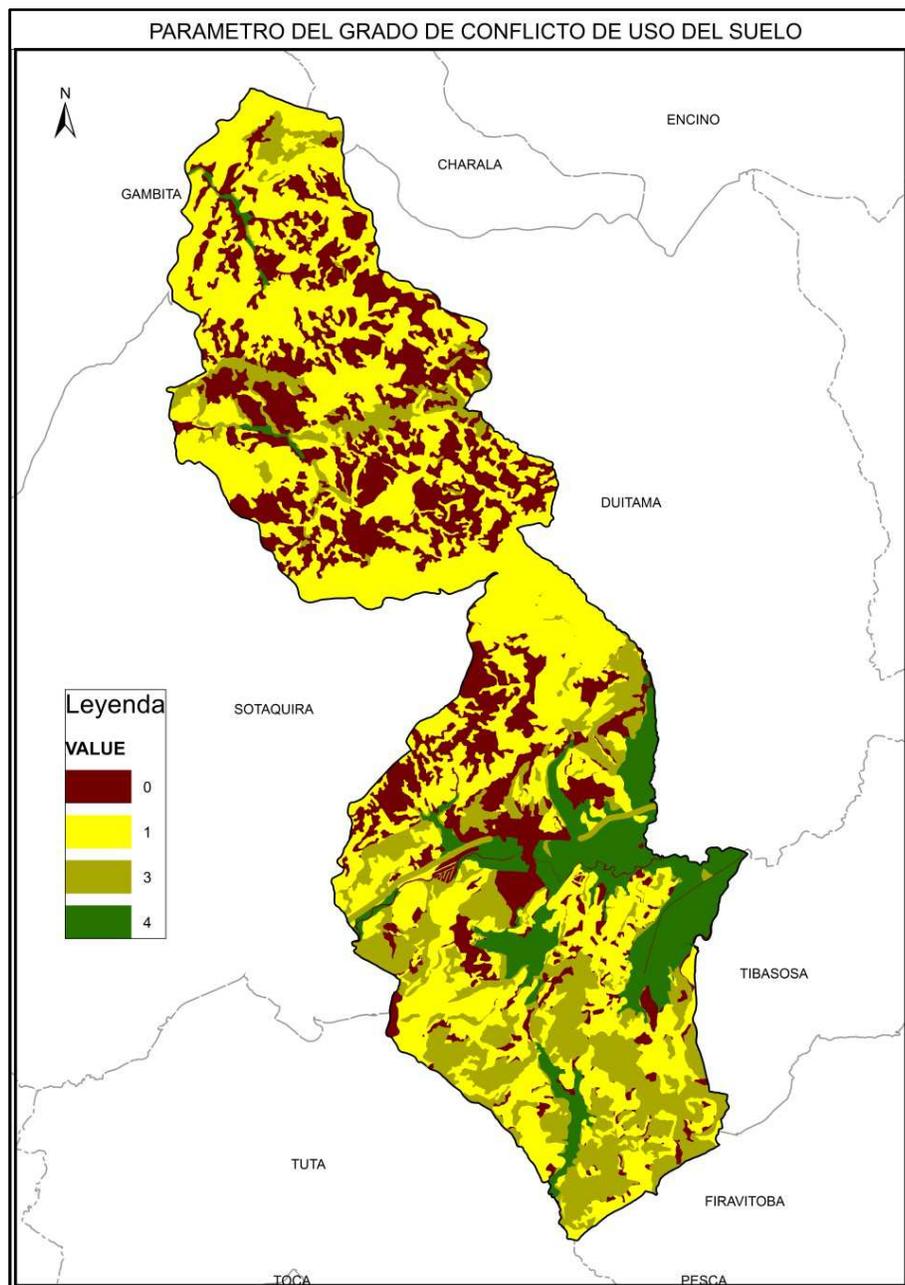
c. Mapa del indicador A3



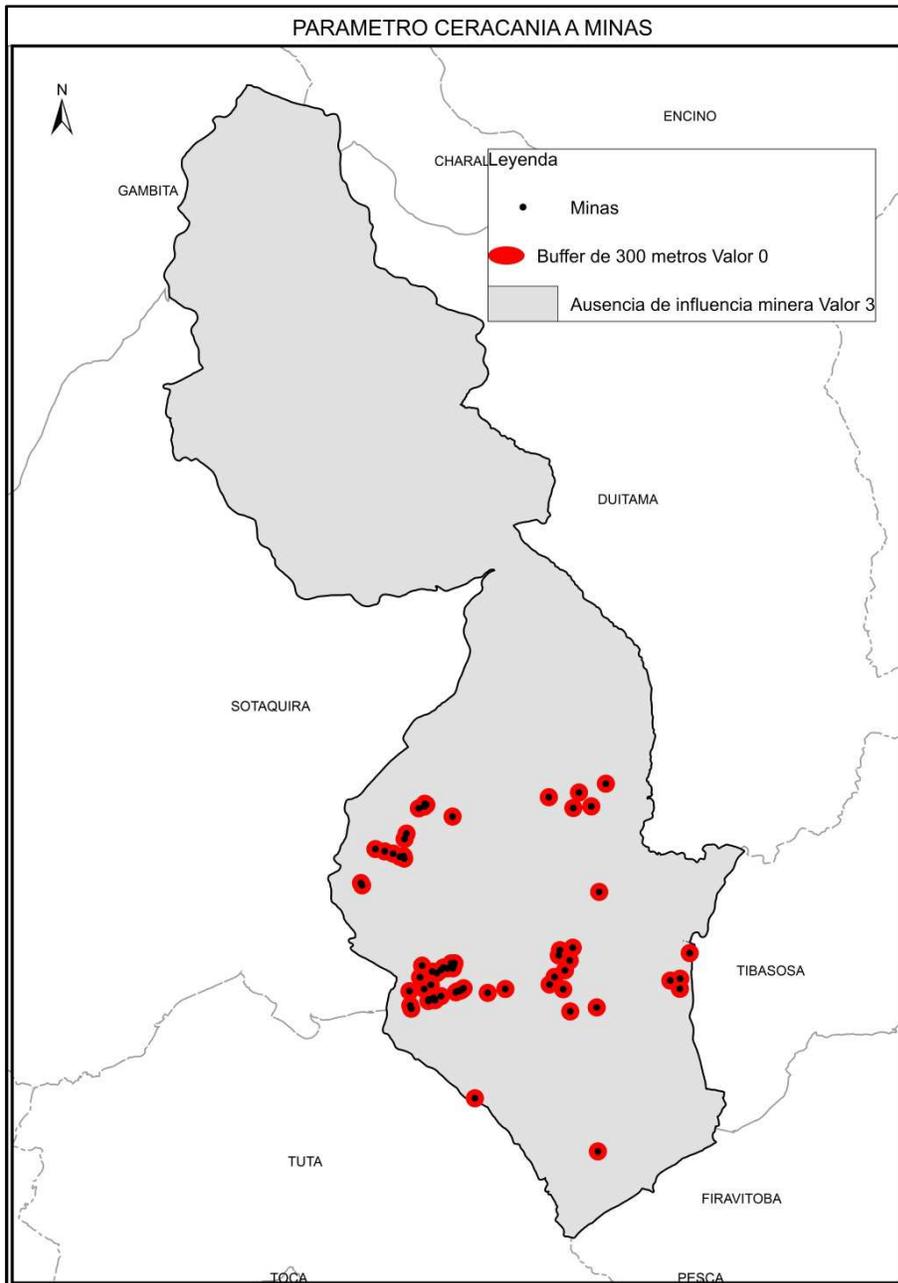
d. Mapa del indicador B1



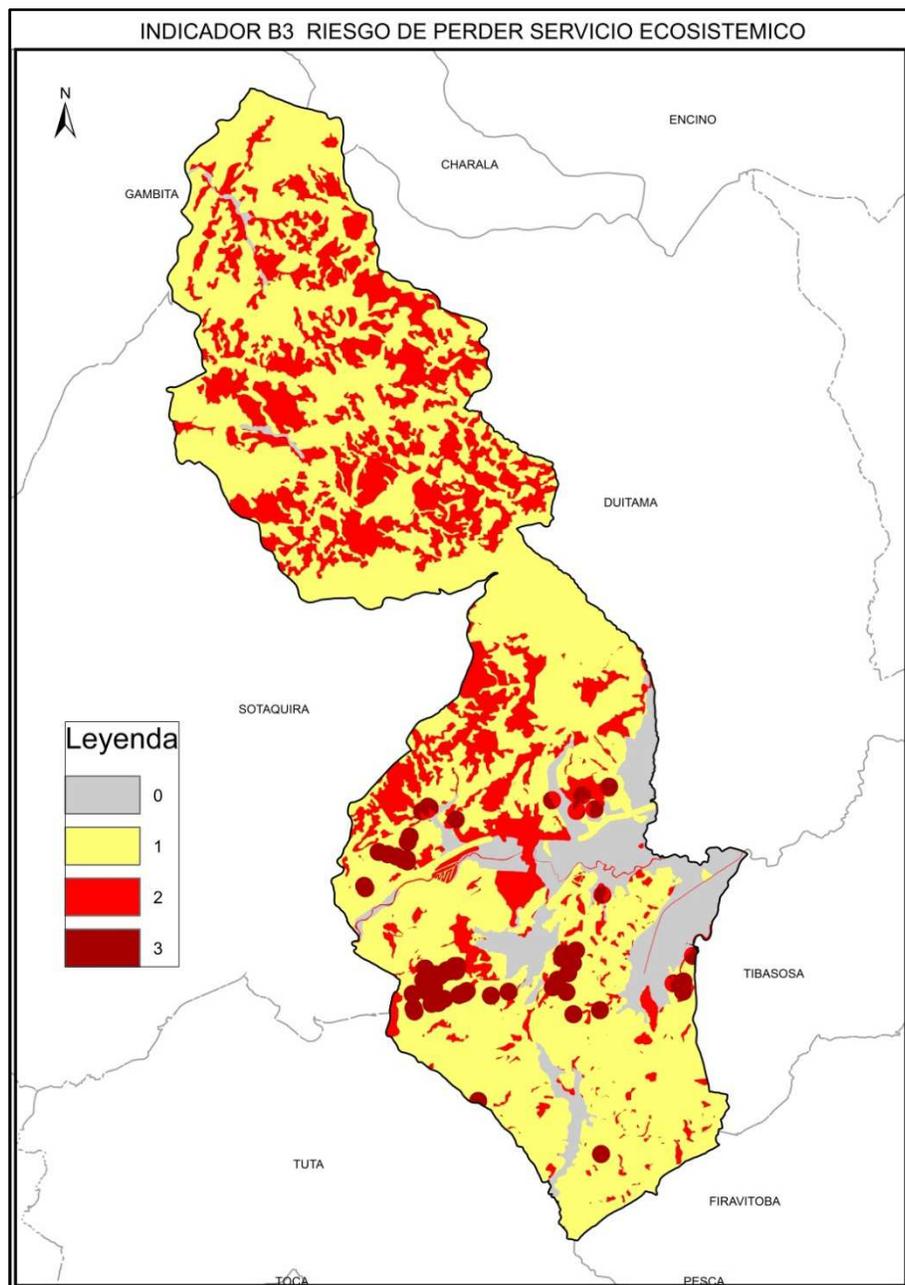
e. Mapa del indicador B2

f. Mapa del Parámetro 1 del indicador B3

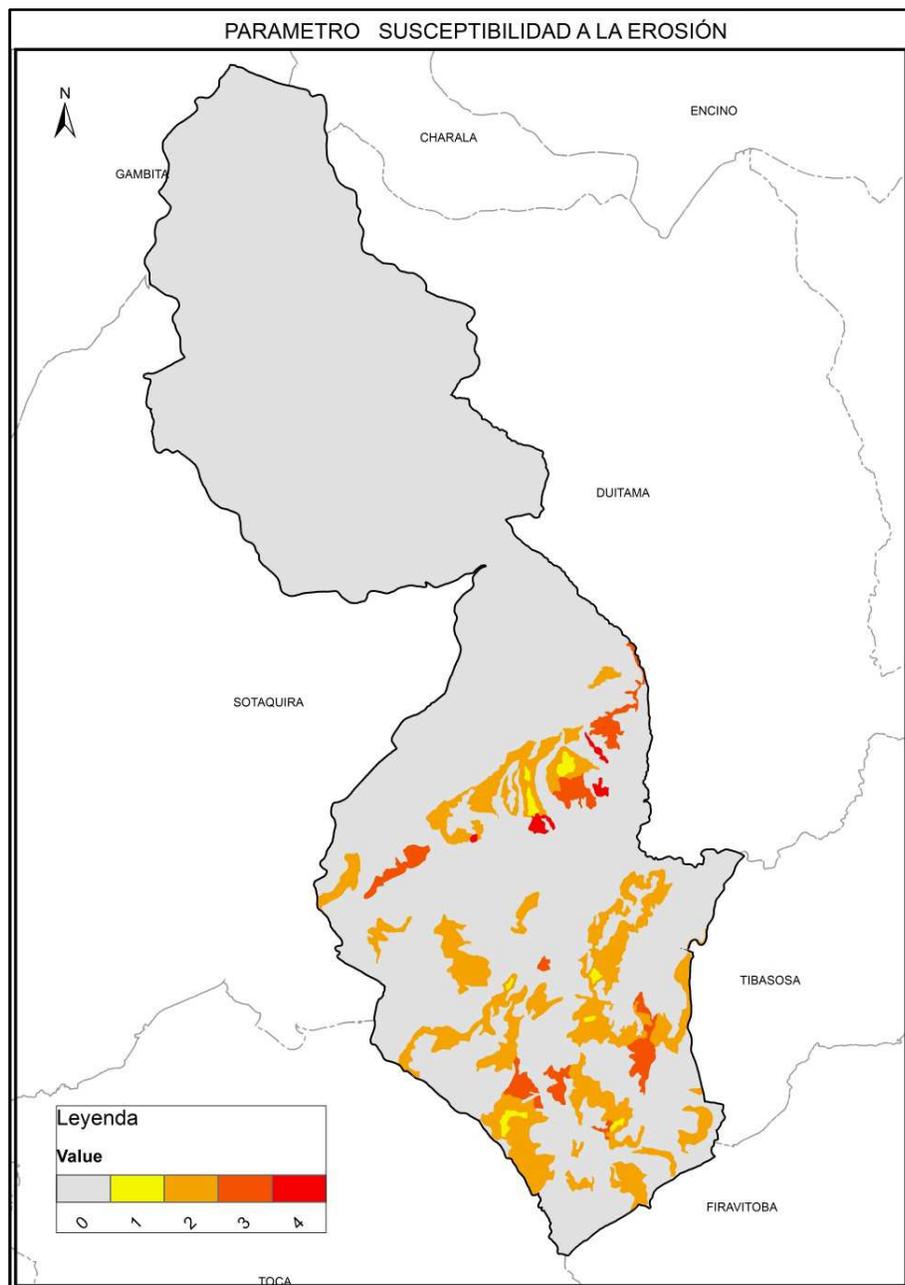
g. Mapa del Parámetro 2 del indicador B3



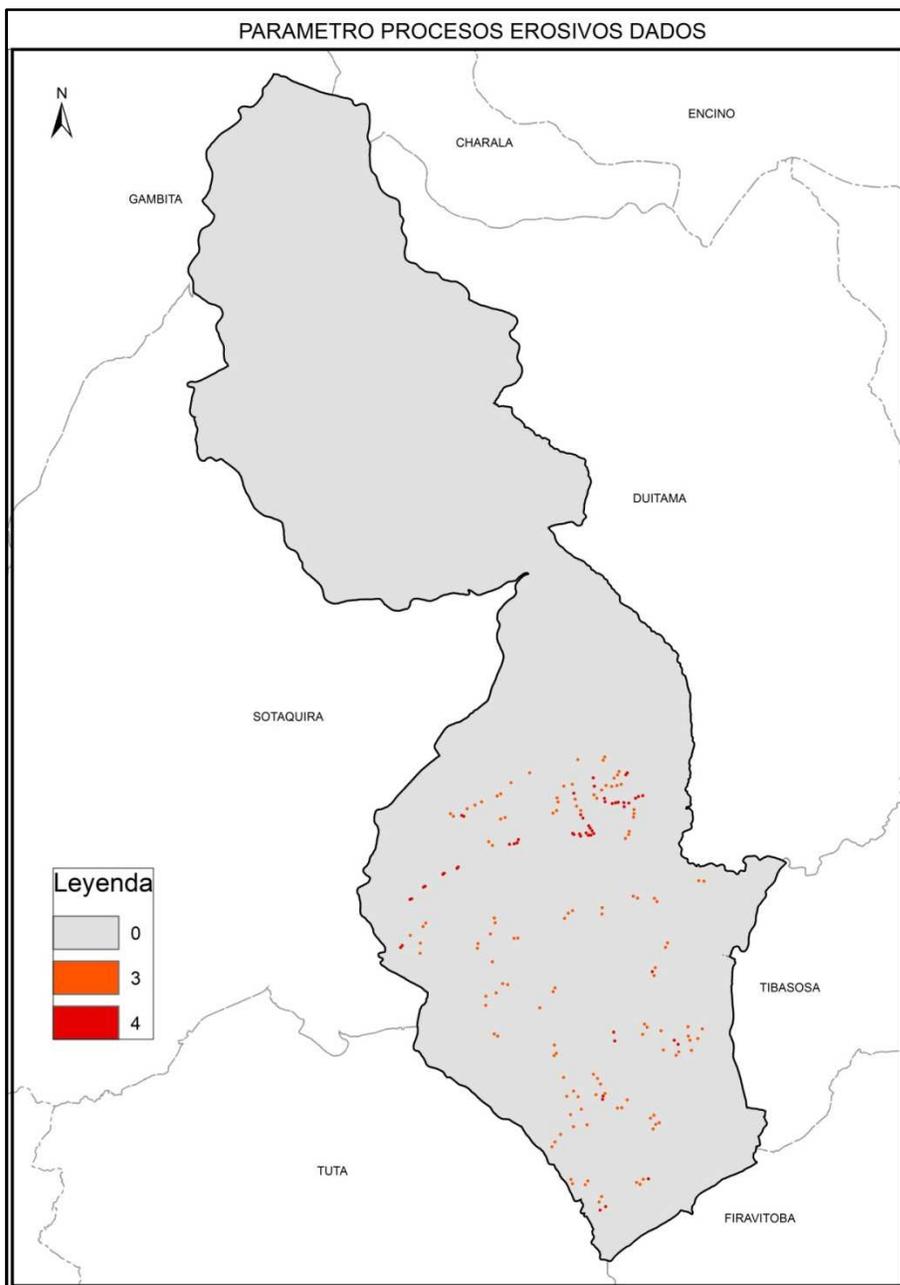
h. Mapa del Indicador B3



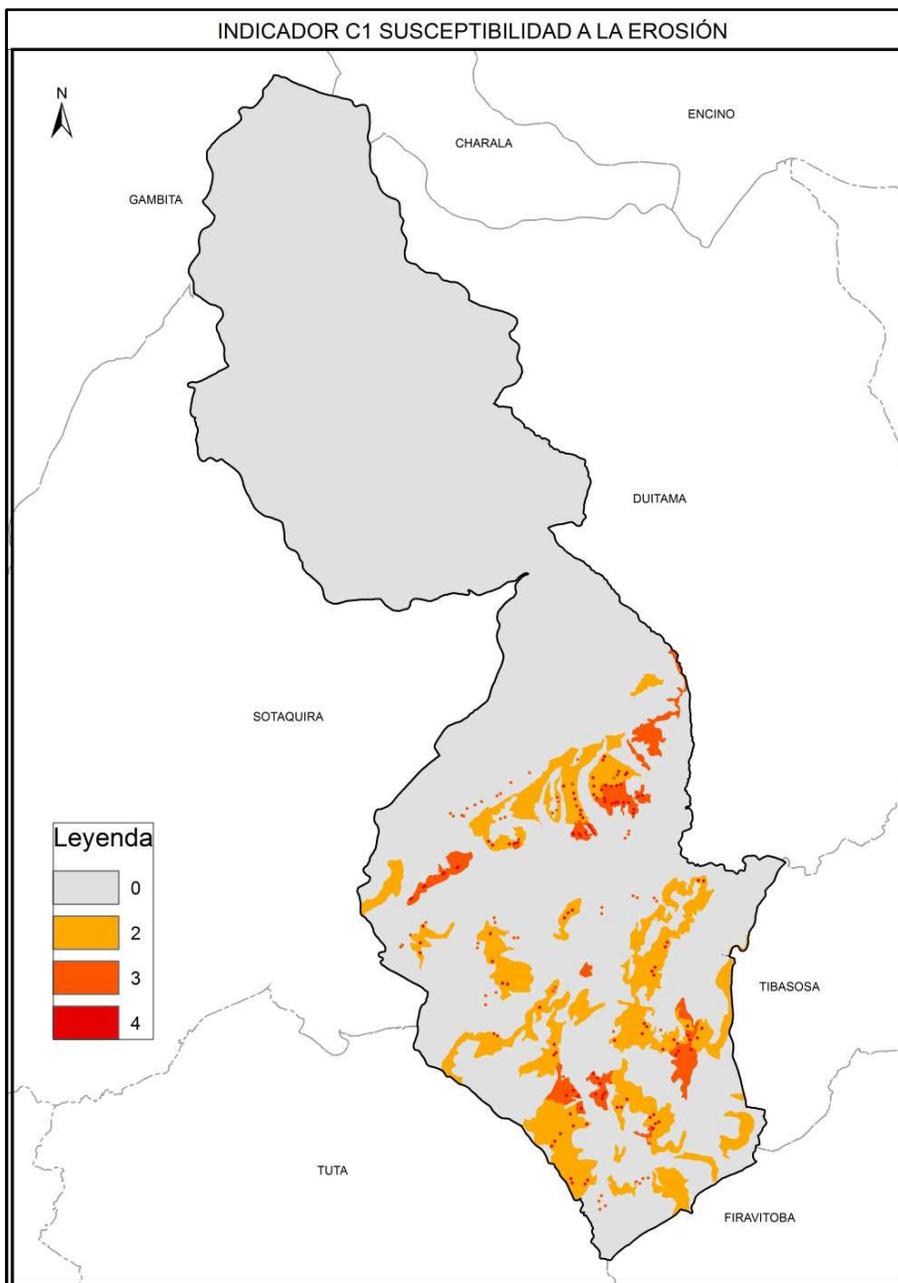
i. Mapa del Parámetro 1 del indicador C1



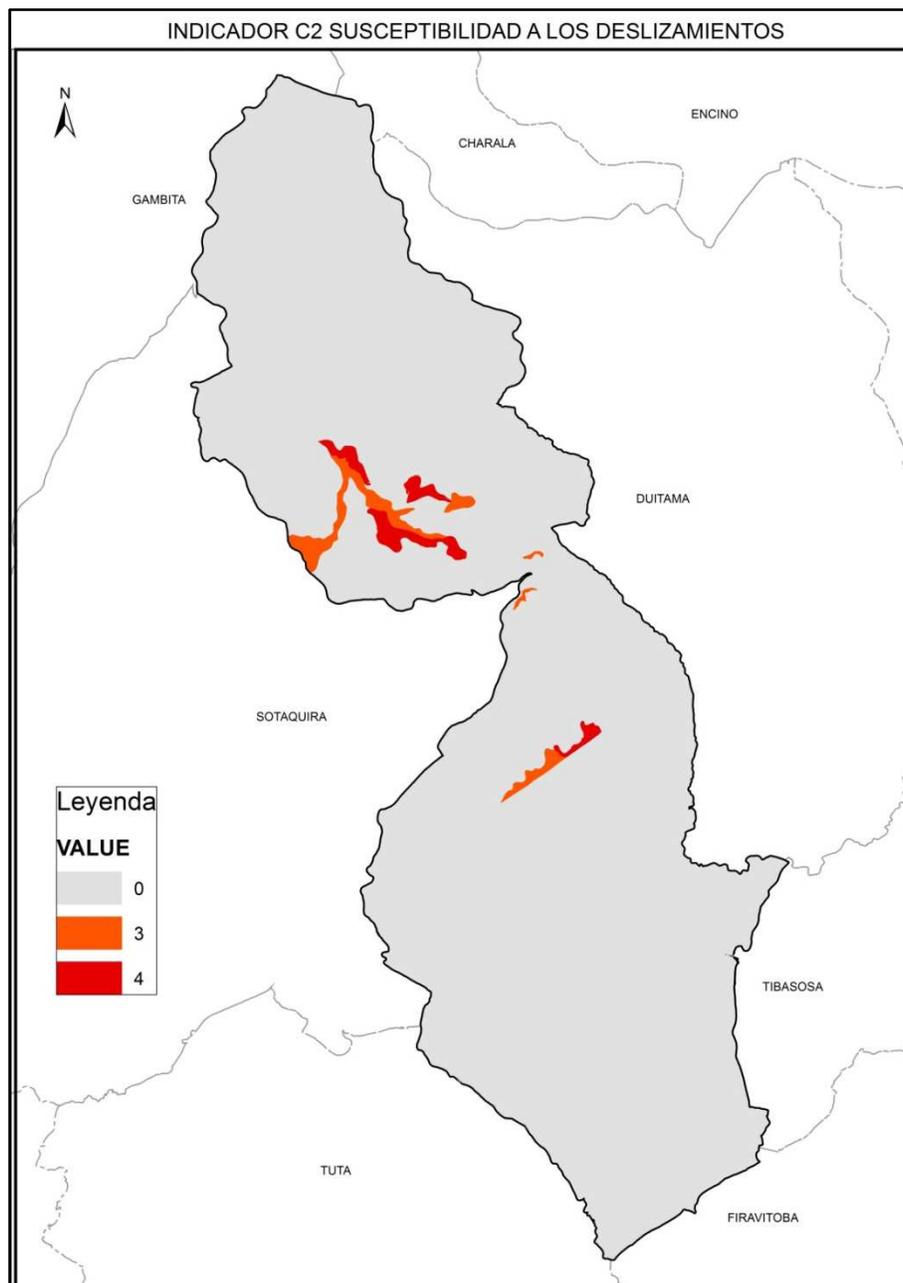
j. Mapa del Parámetro 2 del indicador C1



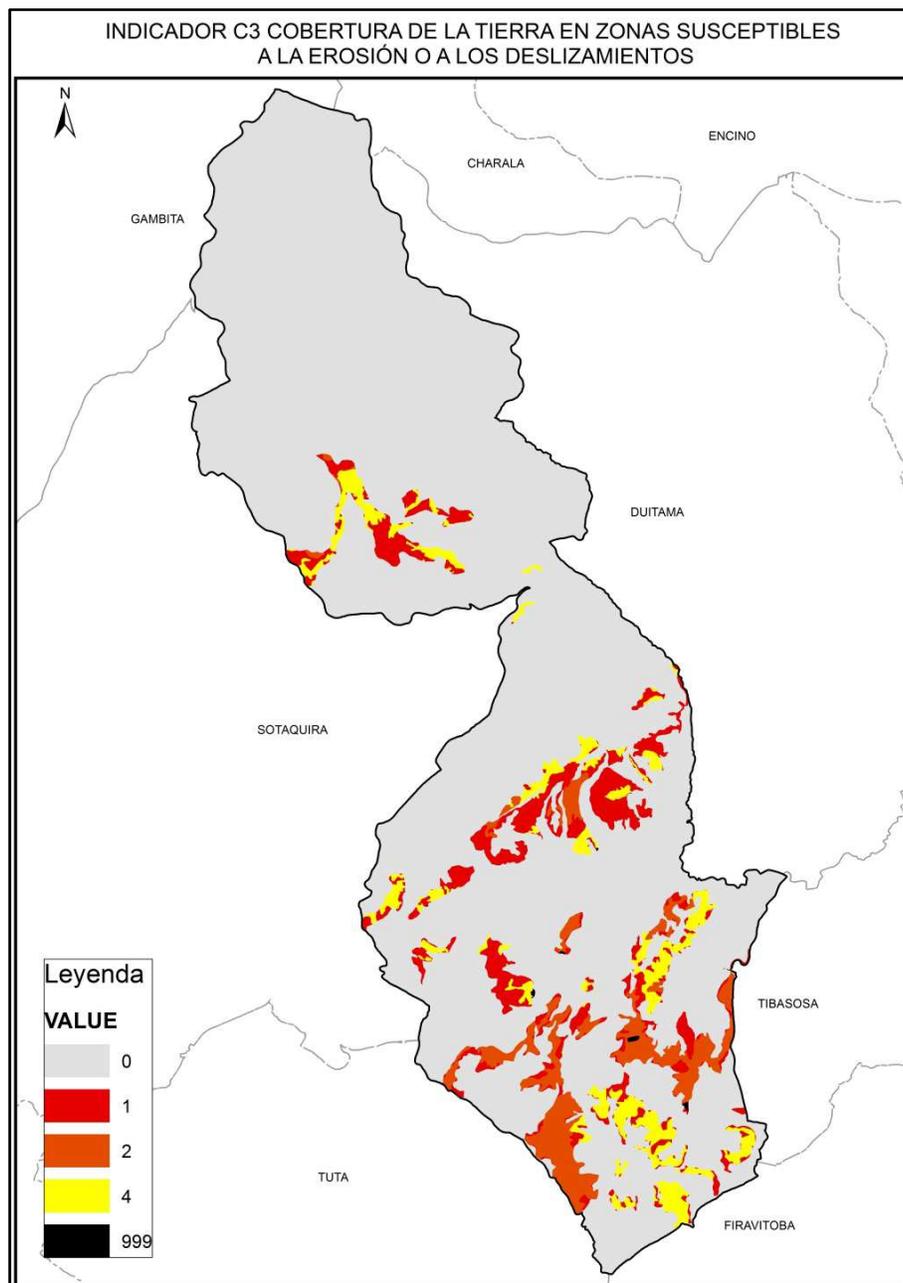
k. Mapa del Indicador C1



I. Mapa del Indicador C2

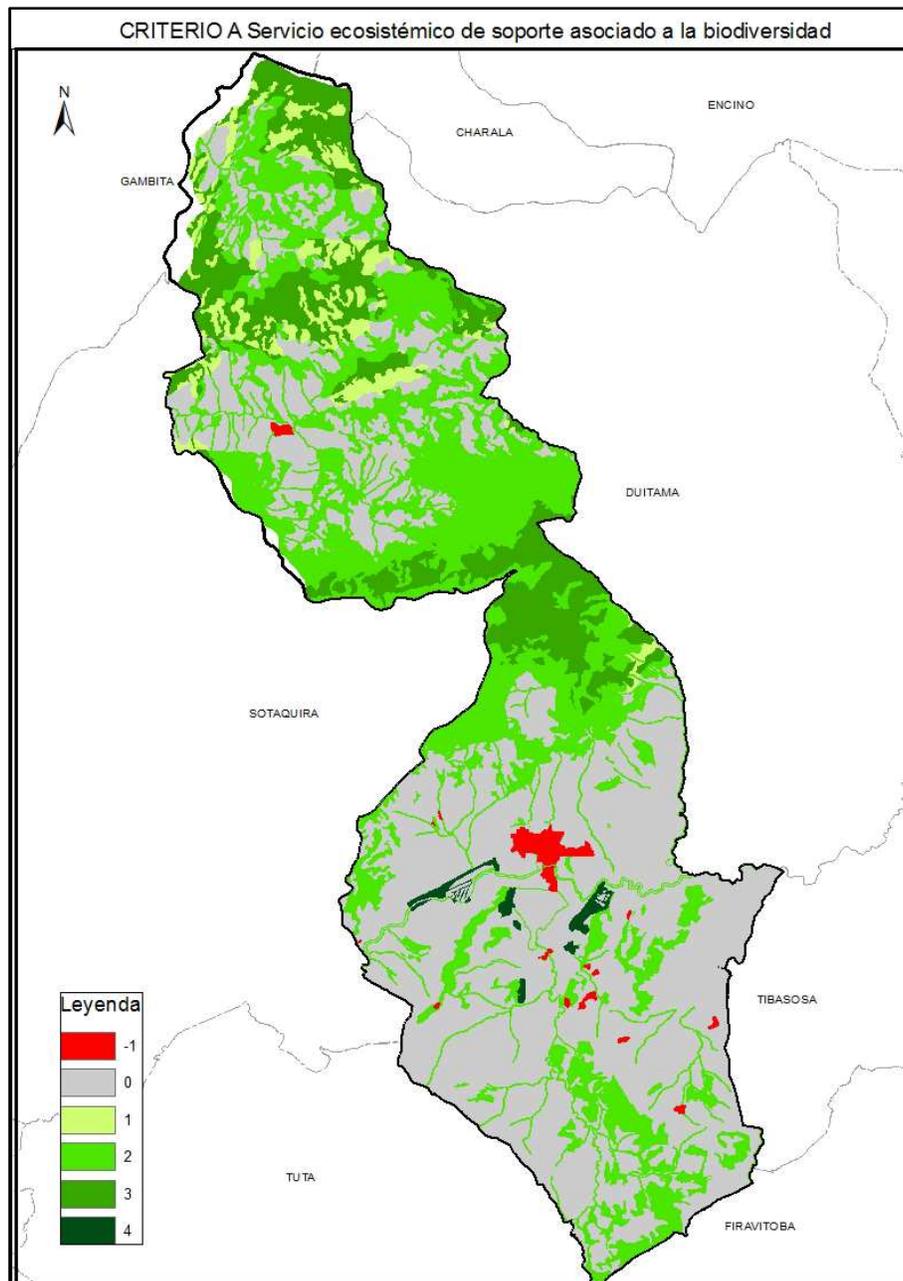


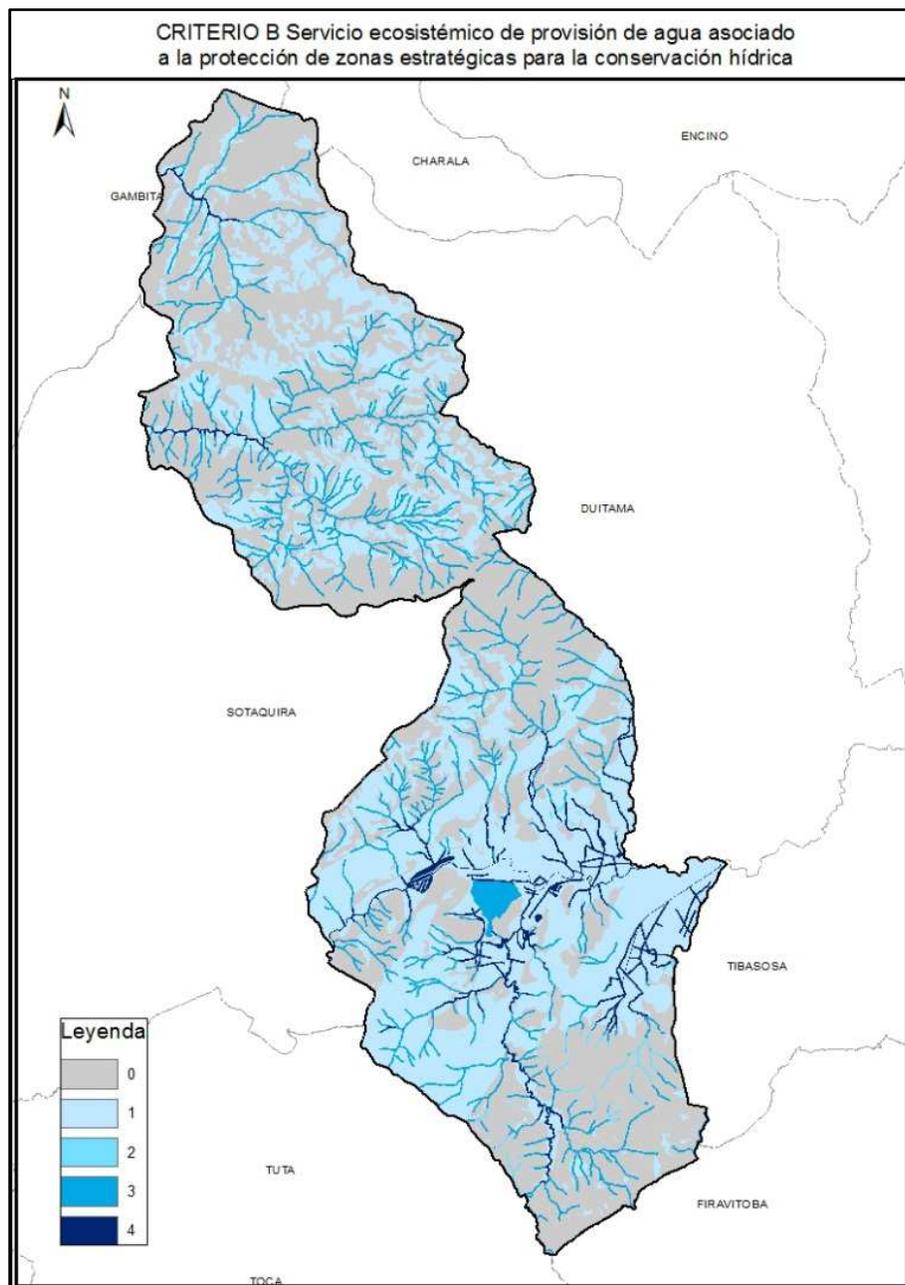
m. Mapa del Indicador C3



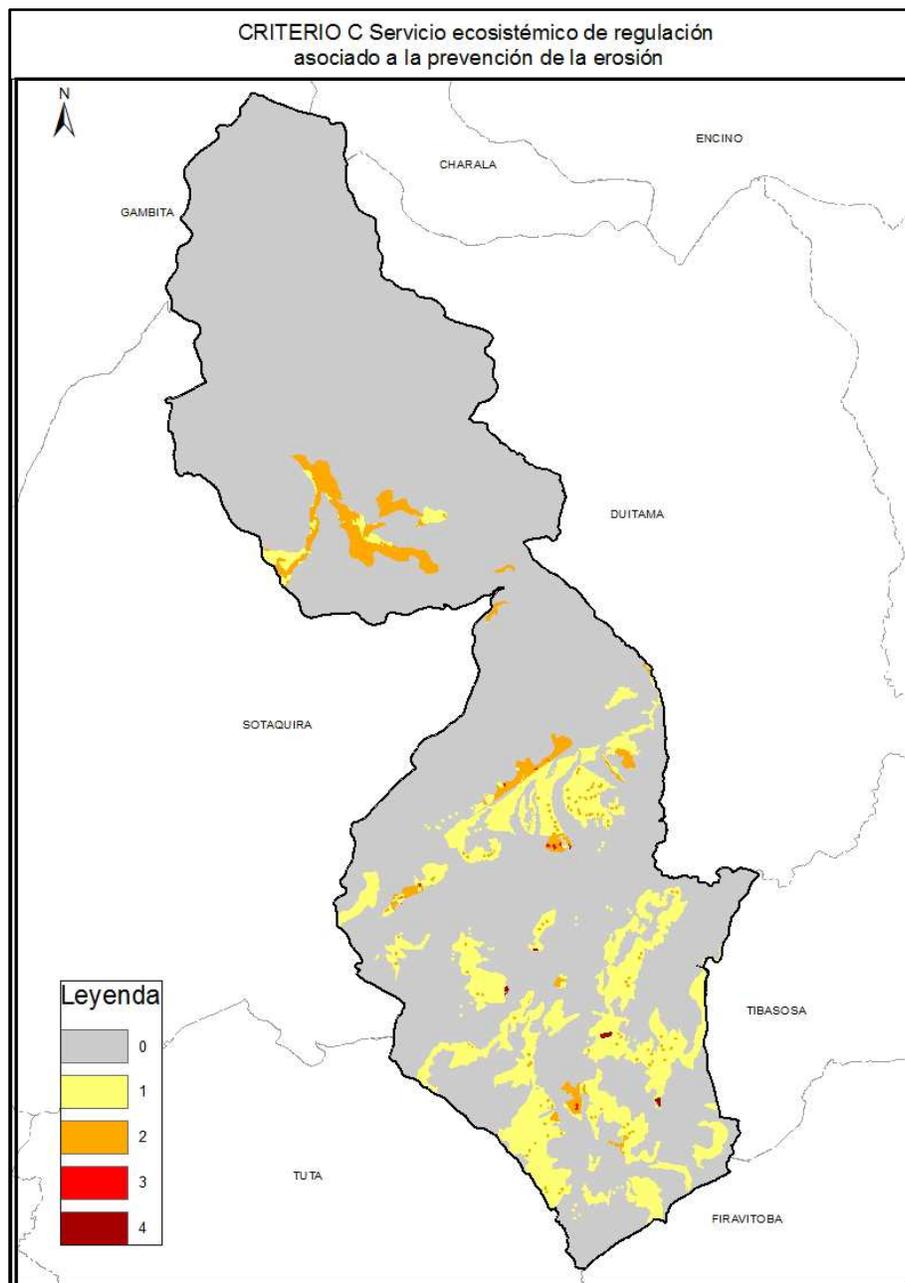
IV. ANEXO MAPA DE LOS CRITERIOS

a. Mapa del Criterio A



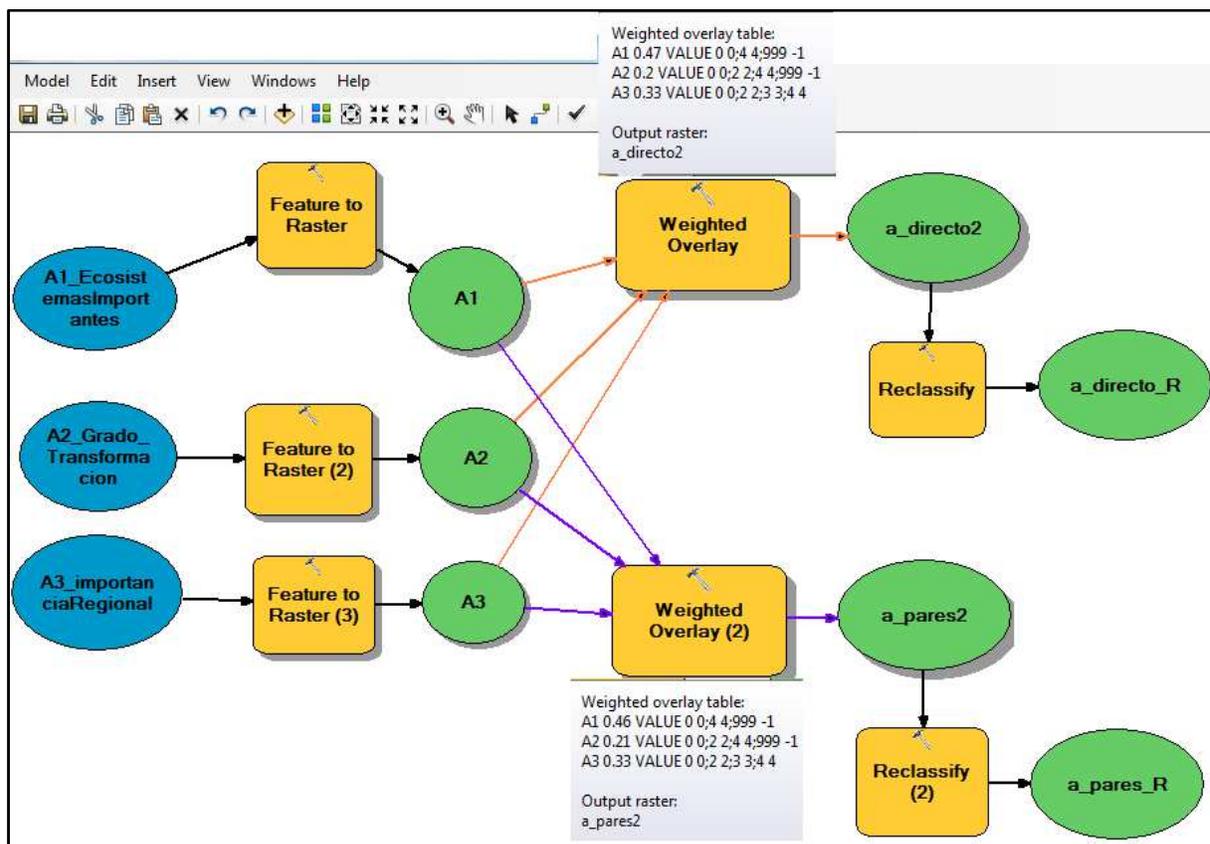
b. Mapa del Criterio B

c. Mapa del Criterio C

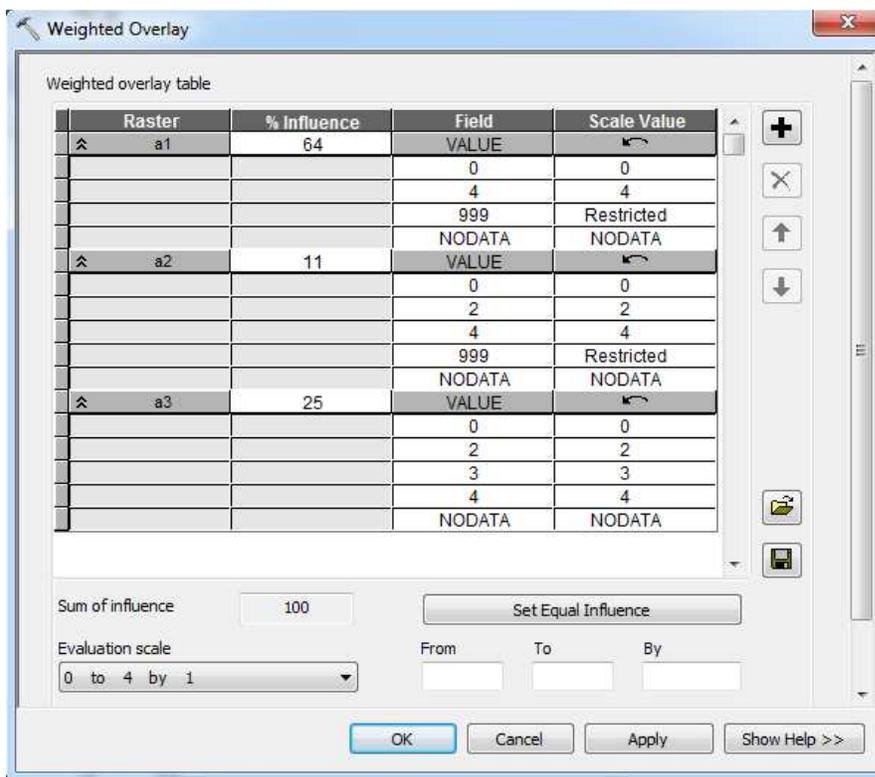


V. ANEXO PARÁMETROS EN LAS HERRAMIENTAS DE ARCGIS EN LA IMPLEMENTACIÓN

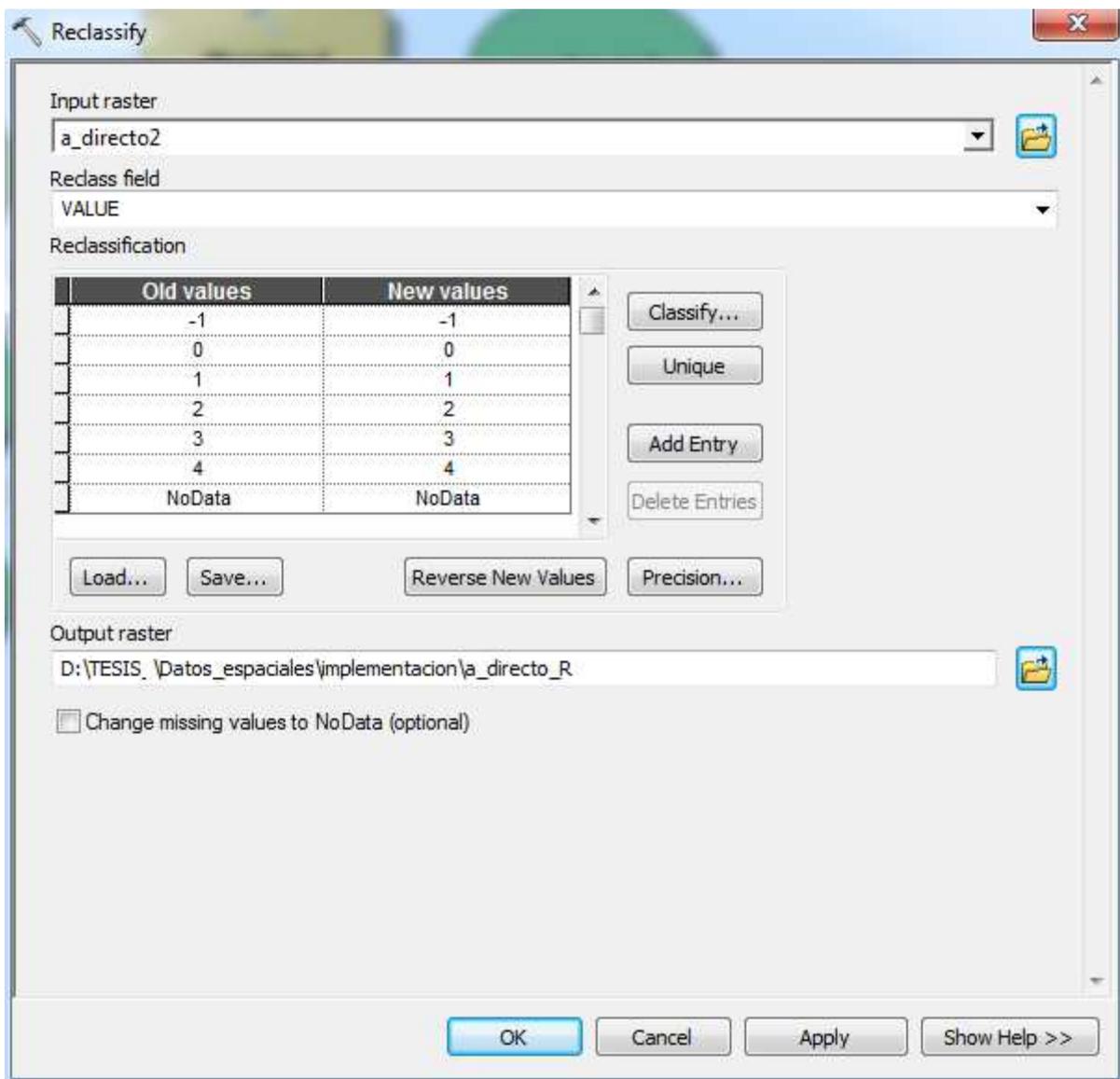
a. Model Builder 1 Criterio A



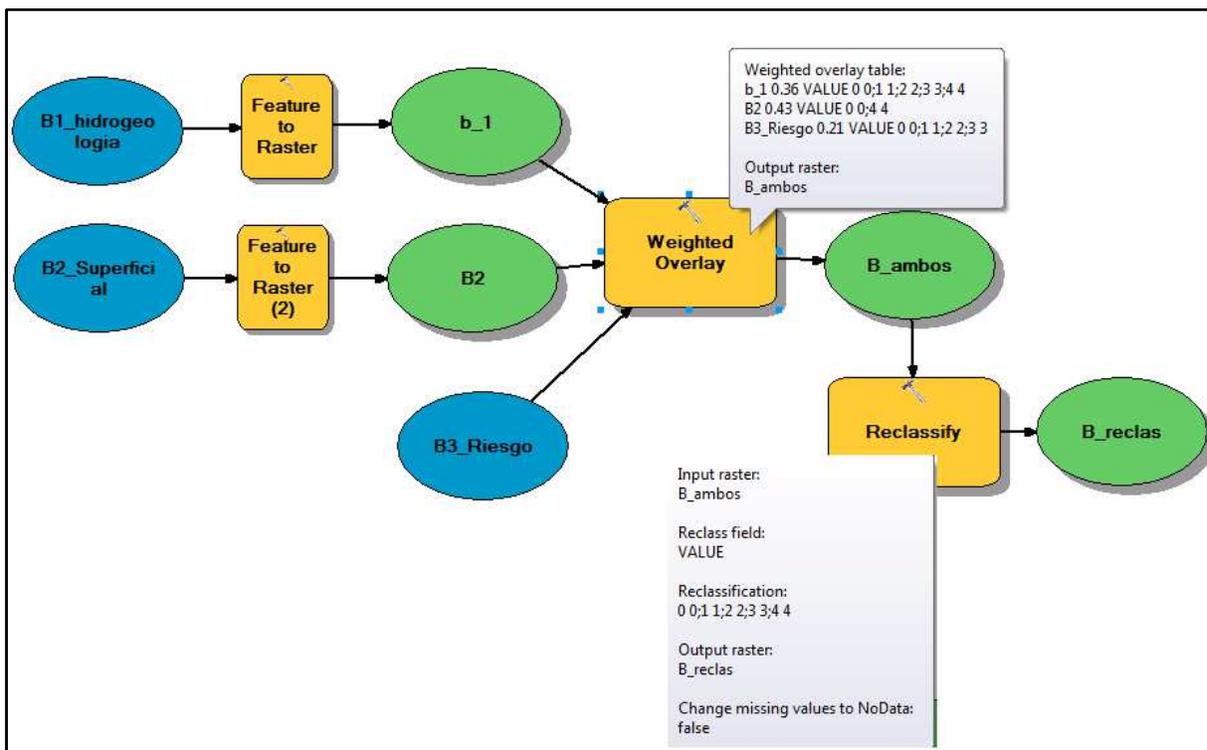
b. Weighted Overlay 2 Criterio A



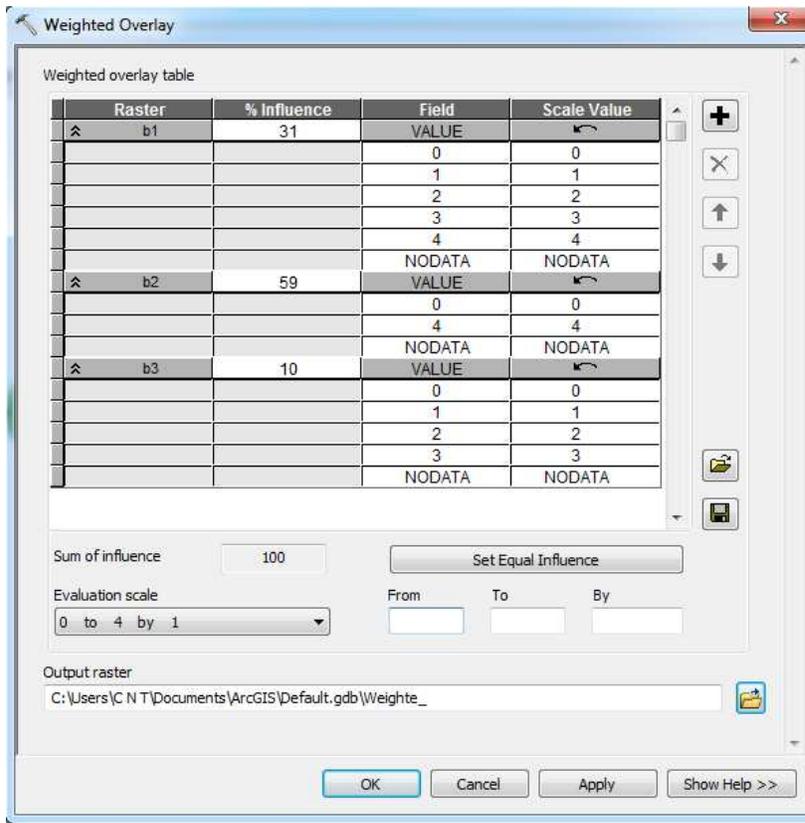
c. Criterio A Reclasificación por el método de único valor para los raster obtenidos por los dos métodos



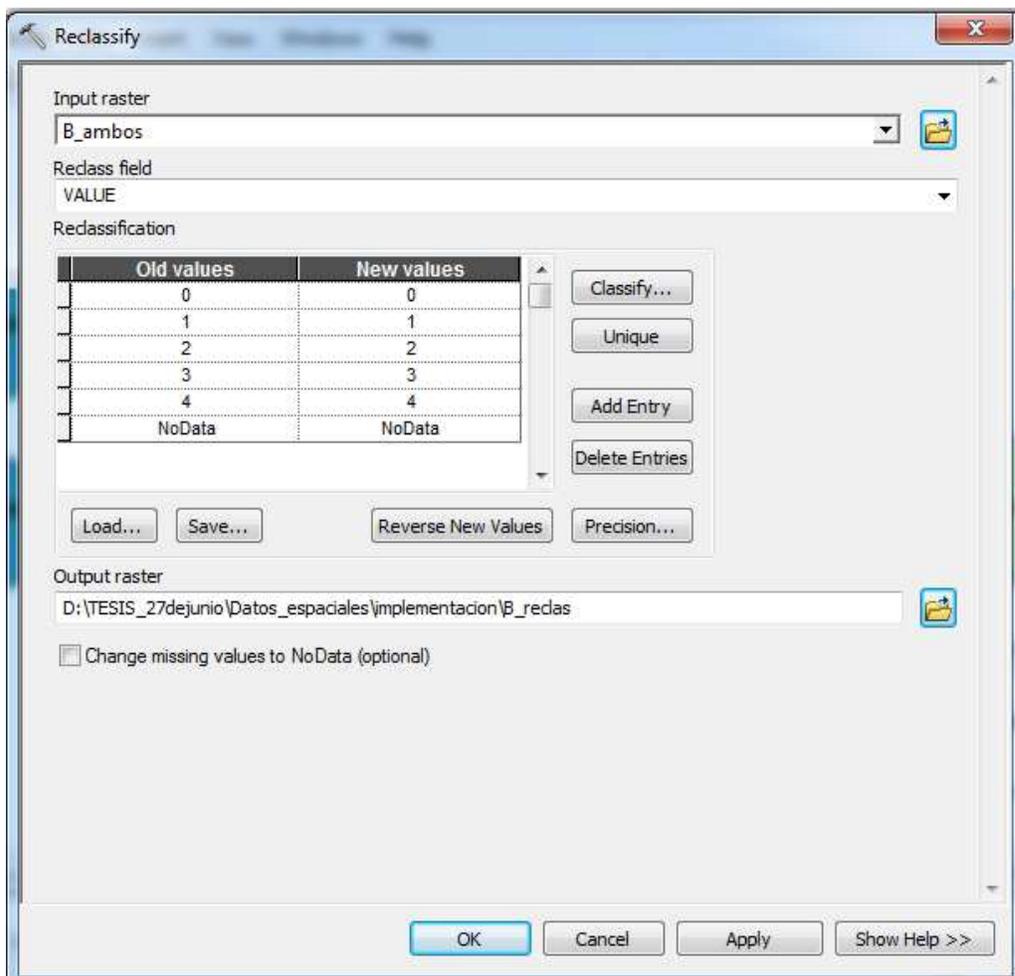
d. Model Builder 3 Criterio B



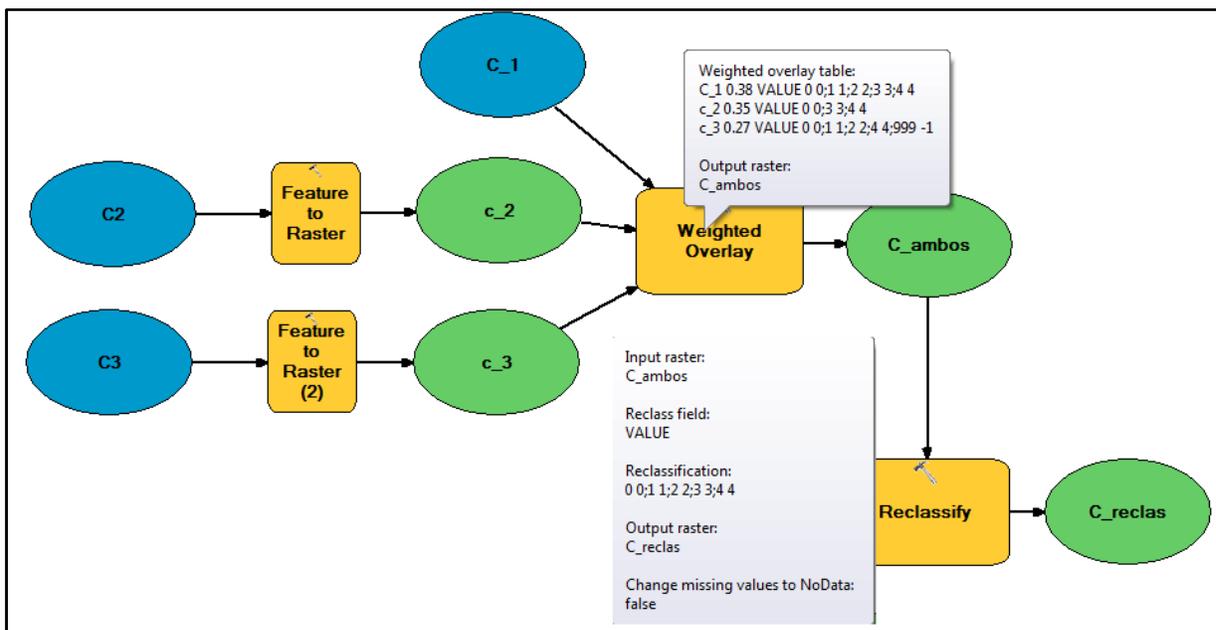
e. Weighted Overlay 2 Criterio B



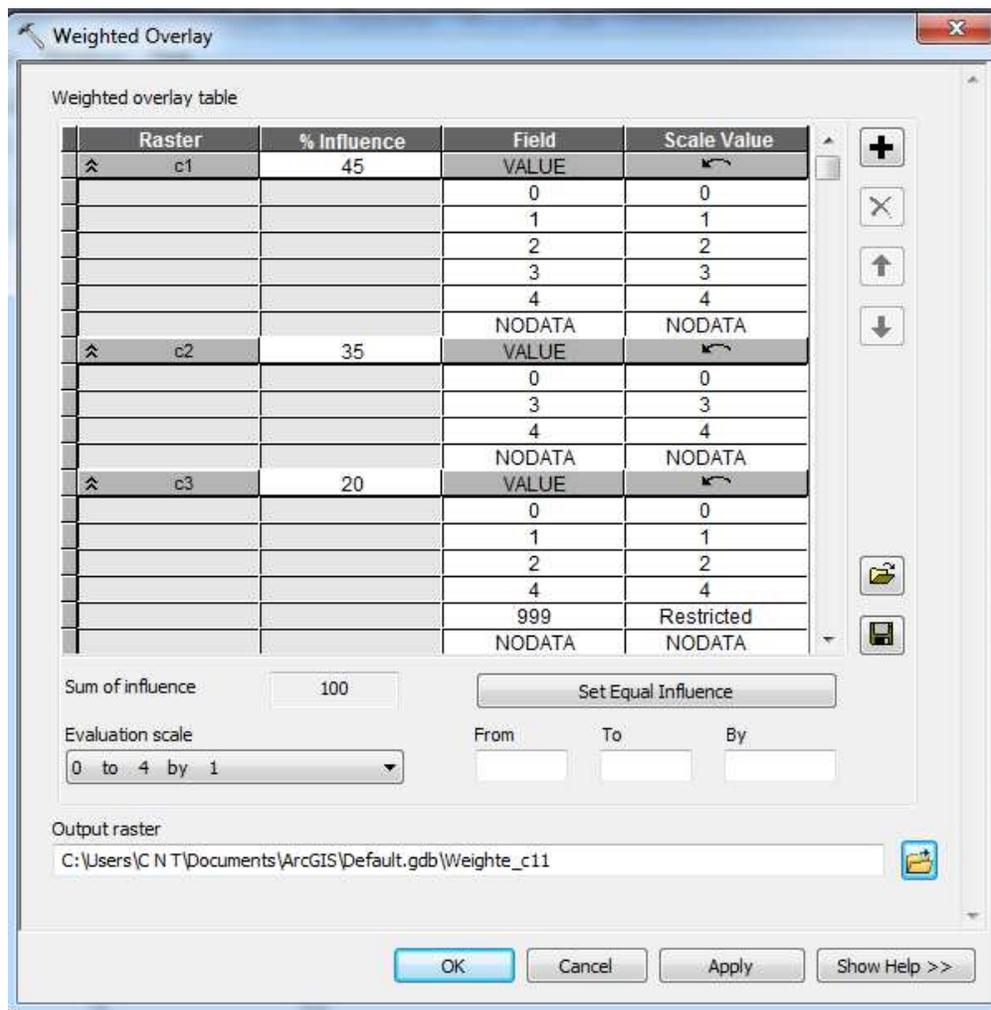
f. Criterio B Reclasificación por el método de único valor para los raster obtenidos por los dos métodos



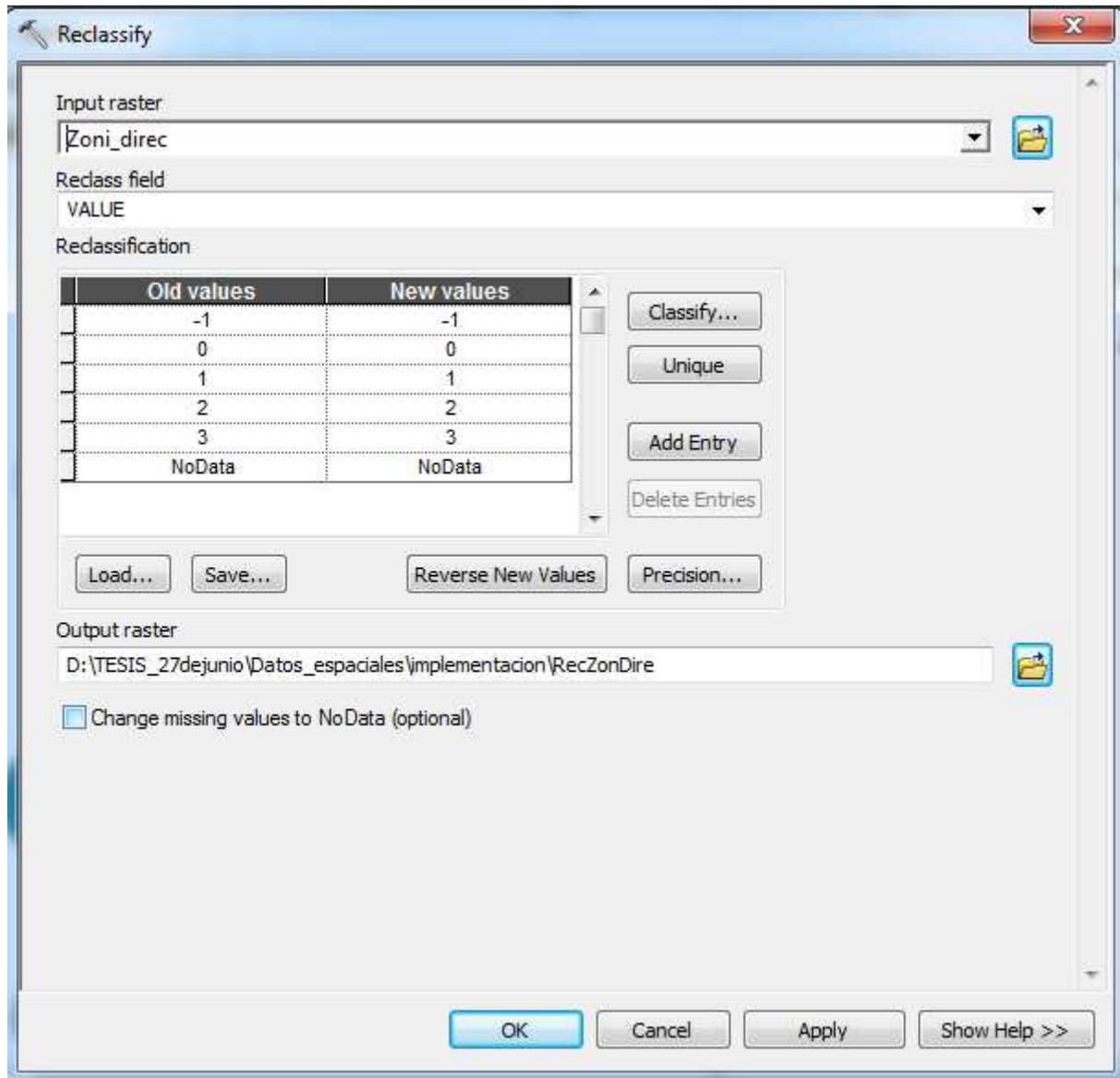
g. Model Builder 4 Criterio C

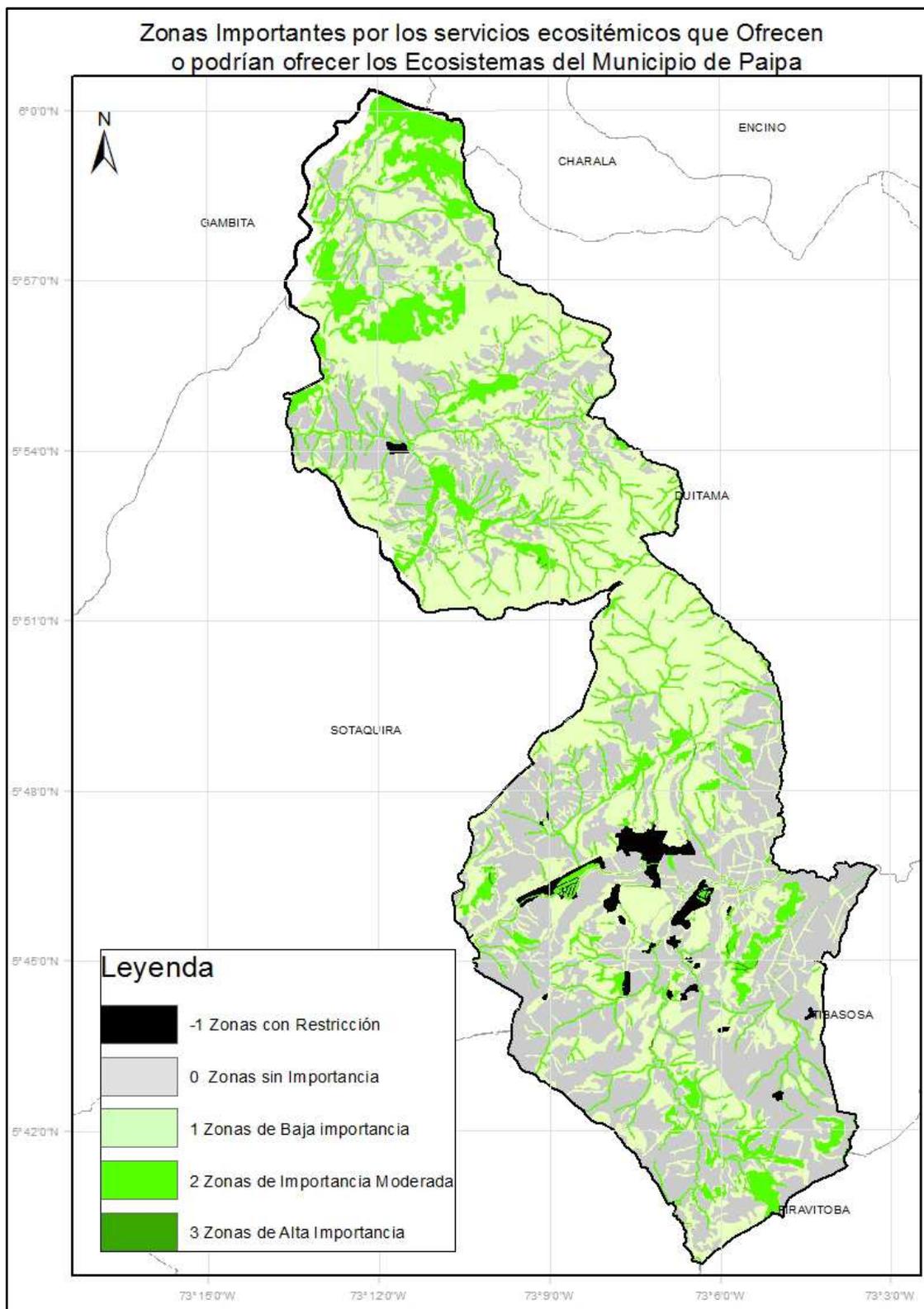


h. Weighted Overlay 3 Criterio C

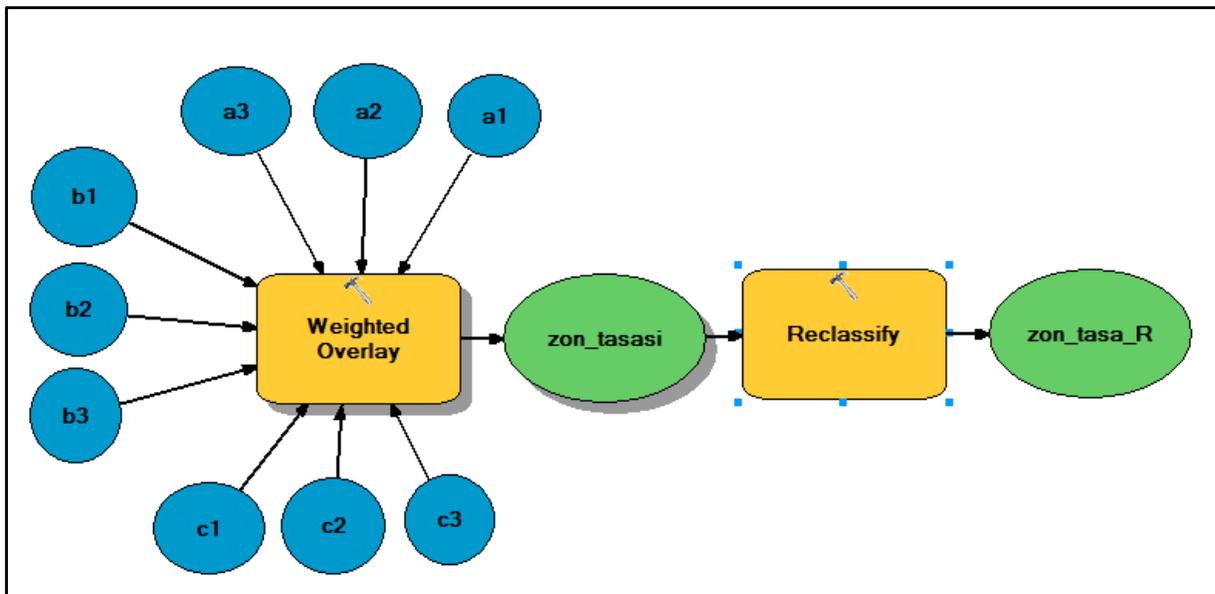


i. **Reclasificación por el método de único valor para los raster de zonificación obtenidos por los métodos directo y de pares**





j. Model builder 4 del mapa de zonificación obtenido con el método de Tasación simple



k. Mapa zonificación obtenido por el método de Tasación simple.

