

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

**Estado de los humedales de la cuenca alta del río Otún
(Departamento de Risaralda, Colombia). Una reinterpretación
desde la estadística espacial**

Santiago Restrepo Calle

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, abril de 2014

Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Posgrados

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Estado de los humedales de la cuenca alta del río Otún
(Departamento de Risaralda, Colombia). Una reinterpretación
geoestadística**

Santiago Restrepo Calle

Richard Resl, Ph.Dc.
Director de Tesis

Pablo Cabrera Ms.
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, abril 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.

SANTIAGO RESTREPO CALLE

Pasaporte: 10027623, Colombia

Quito, abril de 2014

A Marcela y Gabriela

A Sebastián

A Jaime y Lucía

Todos ustedes, una constelación de luces

al final del túnel.

AGRADECIMIENTOS

Mis más profundos agradecimientos a todas las personas e instituciones que hicieron posible este trabajo.

A la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A. E.S.P. por permitir y apoyar el uso de la información correspondiente al inventario de humedales. Muy en especial a Adalberto Arroyave y Jorge Marulanda, que acompañaron este proceso desde su inicio con su conocimiento y amistad.

Al Grupo de Investigaciones en Biotecnología y Biodiversidad de la Universidad Tecnológica de Pereira, con quienes realizamos el Inventario de Humedales de la Cuenca Media y Alta del río Otún. Particularmente, a Andrés Duque, maestro y amigo.

Al Grupo de Investigaciones en Ecología Ingeniería y Sociedad, por el apoyo irrestricto y el estímulo en forma de confianza y tiempo. Especialmente a Juan Mauricio Castaño, quien acompañó este proceso en campo, y quien años más tarde proporcionó el impulso final.

A Sebastián Restrepo Calle, con el más profundo amor y respeto profesional y académico. Coach en las difíciles etapas finales de esta carrera llena de cuestas.

A Marcela Uribe Lastra, compañera en mi viaje, proveedora de paciencia y tranquilidad.

A todo el equipo de UNIGIS en América Latina y la Universidad San Francisco de Quito por su apoyo constante.

Un especial agradecimiento a Leonardo Zurita y Richard Resl, tutor y director de tesis respectivamente, por el apoyo sin el cual no hubiera sido posible llegar a la meta.

RESUMEN

Los humedales son ecosistemas de gran importancia para el hombre. Los humedales de la cuenca alta del río Otún en Risaralda (Colombia), son claves por los servicios ecosistémicos derivados de sus funciones, que los hacen imprescindibles para el desarrollo de las actividades humanas en Pereira, donde cerca de 500.000 habitantes dependen del buen funcionamiento hidrológico de la cuenca. Con el fin de establecer el estado de los humedales, sus atributos y los factores de cambio que los amenazan, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira hizo en el año 2005 un inventario de humedales. Este inventario no ha sido revisado desde entonces. Existe la necesidad y la posibilidad de realizar nuevos inventarios, razón por la cual deben explorarse medios para la generación de información óptima a partir de los datos disponibles, de manera que la información actual y futura esté disponible por parte de los expertos para el ordenamiento del recurso hídrico y la gestión de los humedales. Para resolver el problema descrito, la presente investigación hizo un análisis espacial y geoestadístico de los datos levantados en el inventario de humedales de 2005, buscando la mejor manera de establecer en qué lugares la concentración de impactos es más relevante. Los resultados iniciales del análisis no mostraron sitios relevantes por su concentración de impactos sobre los humedales. Sin embargo, tras aplicar análisis de puntos calientes y kriging universal, fue evidente que las zonas de la Vereda El Bosque en Pereira, y la Vereda Cortaderal en Santa Rosa de Cabal presentan humedales significativamente más impactados por las actividades humanas, lo que contradice la idea de que los impactos se distribuyen aleatoriamente, sino que se encuentran concentrados en el espacio. El análisis espacial y geoestadístico es un conjunto de herramientas que permite trascender la percepción de lo evidente para fundamentar la toma de decisiones en el marco de la gestión de cuencas hidrográficas.

ABSTRACT

Wetlands provide vital ecosystem services to mankind. The mountain wetlands located in the upper Otún River watershed (Colombia) improve water quality and regulate a basic flow rate in the Otún River, which is the only source of water supply for approximately 500.000 inhabitants that live in the cities of Pereira and Dosquebradas. With the aim to characterize the condition of these wetlands, an extensive survey was conducted during 2005. As the results have not been evaluated or properly analyzed, there is a need to replicate the wetland survey, and it is required to standardize the data analysis in order to have adequate information readily available for decision making. In order to attend these requirements, the present research analyzes the available data from the wetland inventory of 2005. The principal goal was to get more robust information about the spatial distribution of the driving forces of impact and change acting over wetlands in the upper Otún River watershed. The initial results suggest that the impacts over the wetland ecosystems in the upper Otún River watershed have a random distribution, and would not identify areas where any impacts or change drivers are concentrated. After a proper spatial and geostatistical analysis, with best results residing from hotspot and universal kriging interpolation methods, patterns emerge that clearly show areas with significantly higher impacts over wetland ecosystems. The identified areas are Vereda El Bosque in Pereira, and Vereda Cortaderal in Santa Rosa de Cabal. These findings demonstrate that impacts over wetlands are not randomly distributed, but have significant spatial concentrations. Spatial and Geostatistical Analyses suggest an important methodology that allows to go beyond the immediate perception of environmental phenomena, and to lay the foundation for a proper decision making process in watershed management.

Tabla de Contenidos

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.2 ALCANCE.....	18
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 HUMEDALES.....	20
2.2 IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES	21
2.3 FACTORES DE CAMBIO.....	22
2.4 INVENTARIOS DE HUMEDALES.....	25
2.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADOS AL ESTUDIO DE LOS HUMEDALES.....	26
3 OBJETIVOS.....	31
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	31
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
4 METODOLOGÍA.....	32
4.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	32
4.1.1 ASPECTOS GENERALES.....	34
4.1.2 ASPECTOS FÍSICOS	35

4.1.3	ASPECTOS BIOLÓGICOS	37
4.1.4	ASPECTOS SOCIOECONOMICOS	38
4.2	AJUSTE DE LA INFORMACIÓN	41
4.2.1	Impactos Sobre Suelos e Hidrología	43
4.2.2	Impactos Sobre la Calidad del Agua	43
4.2.3	Impactos Sobre Procesos Biológicos.....	44
4.2.4	Impactos Sistémicos	44
4.3	SELECCIÓN DE PUNTOS.....	45
4.4	EXPLORACIÓN DE DATOS.....	45
4.5	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ESPACIALES	46
4.5.1	Polígonos de Voronoi	46
4.5.2	Índice Moran's I	47
4.5.3	Índice Getis-Ord G General.....	48
4.5.4	Análisis de Vecino más Próximo (<i>Nearest Neighbor Analysis</i>).....	49
4.6	INTERPOLACIÓN DE DATOS	49
4.6.1	Interpolación determinística	50
4.6.2	Interpolación probabilística	51
5	RESULTADOS	53
5.1	AJUSTE DE DATOS Y SELECCIÓN DE PUNTOS.....	53
5.2	EXPLORACIÓN DE DATOS.....	55
5.2.1	ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS	55

5.2.2	PRUEBAS DE NORMALIDAD	58
5.3	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ESPACIALES (ESDA)	63
5.3.1	GRÁFICO CUANTIL-CUANTIL CON CAPACIDADES ESPACIALES .	63
5.3.2	POLÍGONOS DE VORONOI.....	65
5.3.3	PATRONES DE DATOS – ÍNDICE MORAN’S I	67
5.3.4	PATRONES DE DATOS – ÍNDICE GETIS-ORD GENERAL G.....	68
5.3.5	PATRONES DE DATOS – VECINO MÁS PRÓXIMO (<i>NEAREST NEIGHBOR</i>).....	71
5.4	PREDICCIÓN ESPACIAL MEDIANTE INTERPOLACIÓN	71
5.4.1	INTERPOLACIÓN DETERMINÍSTICA – INTERPOLACIÓN INVERSA A LA DISTANCIA (IDW).....	72
5.4.2	INTERPOLACIÓN PROBABILÍSTICA – INTERPOLACIÓN INVERSA A LA DISTANCIA (IDW).....	74
6	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	82
7	CONCLUSIONES.....	89
8	BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico.	32
Figura 2. Ubicación y delimitación del área de estudio. Izquierda arriba: República de Colombia y Departamento de Risaralda. Izquierda abajo, cuenca hidrográfica del río Otún. Derecha, área de estudio.	34
Figura 3. Flujo de piroclastos del nevado de Santa Isabel que dio origen a la Laguna del Otún. Estos flujos fueron de gran importancia en la formación del paisaje en la cuenca alta del río Otún. Foto: Santiago Restrepo C. (2005).	37
Figura 4. Puntos levantados en humedales seleccionados para la realización de análisis espaciales en la cuenca alta de río Otún.	54
Figura 5. Humedales de la cuenca alta del río Otún simbolizados según la magnitud de los impactos registrados.	55
Figura 6. Histograma de frecuencias para los datos de impactos totales ponderados y normalizados. Los impactos totales ponderados y normalizados resultan de la ponderación y normalización de los valores cualitativos para la suma los impactos individuales.	58
Figura 7. Gráfico cuantil - cuantil Normalizado (Normalized QQ Plot).	59
Figura 8. Gráfico de cajas y bigotes. Este gráfico muestra la tendencia que tiene la gráfica hacia arriba de la media. Concuerta con un histograma que tiene una cola larga hacia la derecha y mayor cantidad de datos agrupados hacia la derecha.	60
Figura 9. Histograma de los datos después de una transformación logarítmica.	61
Figura 10. Gráfico Q-Q Normalizado para los datos después de transformación logarítmica.	62
Figura 11. Gráfico de cajas y bigotes para los datos después de una transformación logarítmica.	62

Figura 12. Q-Q Plot Normalizado de ArcGIS 10.1 donde se encuentran seleccionados los subrepresentados, con valores anómalamente altos y su correspondencia en el mapa.	64
Figura 13. Polígonos de Voronoi calculados para el área de estudio de acuerdo a diferentes estadísticos (Valor, Media, Moda y Cluster). Aunque representando datos simples no se observan tendencias, es posible apreciar agrupaciones representando la media y la moda.	66
Figura 14. Mapa de polígonos de Voronoi. Los polígonos se simbolizan según el valor promedio de cada polígono y sus vecinos.	67
Figura 15. Resultados del cálculo del Índice Moran's I.	68
Figura 16. Resumen de datos resultante del cálculo del índice Getis-Ord General G.	69
Figura 17. Mapa de <i>Hot Spots</i> (Puntos Calientes) de impactos sobre los humedales en el área de estudio.	70
Figura 18. Resultados del análisis de vecino más próximo.	71
Figura 19. Impactos sobre los humedales en la cuenca alta del río Otún. Interpolación de datos mediante <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW).	73
Figura 20. Gráfico de análisis de tendencia de los datos de impactos para los humedales en el área de estudio.	75
Figura 21. Semivariograma mostrando la relación entre todas las parejas de puntos en el área de estudio.	76
Figura 22. Ajuste del variograma empírico optimizado al modelo teórico K-Bessel.	77
Figura 23. Parámetros utilizados para la construcción de la superficie de predicción.	78
Figura 24. Superficie predictiva de impactos a los humedales en el área de estudio, obtenida con un Kriging Simple.	79
Figura 25. Mapa predictivo de error estándar para la superficie predictiva generada con kriging simple.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis de conflictos que derivan en pérdida de humedales en Colombia.	23
Tabla 2. Tabla de ponderación de impactos.	42
Tabla 3. Descripción de impactos sobre suelos e hidrología.....	43
Tabla 4. Descripción de impactos sobre calidad del agua.	44
Tabla 5. Descripción de impactos sobre los procesos ecológicos.	44
Tabla 6. Resumen de los estadísticos descriptivos.	57
Tabla 7. Pruebas de normalidad para datos después de transformación logarítmica.	61
Tabla 8. Parámetros utilizados para el IDW.....	72

1 INTRODUCCIÓN

Se ha identificado la escasez de agua como uno de los principales problemas globales del presente siglo, con una población creciente y una reserva de agua que se mantiene, en el mejor de los casos, constante. El 50% del agua disponible para el hombre, ya es utilizada en labores agropecuarias y productivas. La escasez de agua podría limitar la producción agrícola e industrial del hombre, así como sus condiciones de bienestar (Srinivasan et al., 2012).

Los humedales, se definen por parte de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR) como *“las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”* (Ramsar Convention Secretariat, 2013).

Estos ecosistemas son de capital importancia para el hombre. Con sólo el 6% de la superficie terrestre, representan un elemento crítico para el mantenimiento de los ciclos biogeoquímicos y la regulación hidrológica, así como para el mantenimiento de la biodiversidad y de pueblos y culturas ancestrales asociadas a ellos. (Junk et al., 2012). Se ha demostrado que la importancia de los humedales por sus funciones hidrológicas varía entre tipos de humedal, sin embargo, todos ellos desempeñan por lo menos alguna de las diferentes funciones relacionadas con el ciclo hidrológico (Bullock and Acreman, 1999). A pesar de esto, los humedales, han sido tradicionalmente vistos como tierras inservibles, que deben ser

transformados en áreas de producción agrícola o pecuaria (Junk et al., 2012); o eliminados para el establecimiento de infraestructura.

Los humedales surgen, pues, como objeto de necesarias acciones de conservación, no ya con base en la presencia de especies importantes (p.e. aves), sino por la plétora de servicios ecosistémicos que prestan a nuestras sociedades, cuya dependencia se ha puesto en contraste en la medida en que los ecosistemas son cada vez más afectados, con incidencia directa en el bienestar humano (Maltby and Acreman, 2011).

Tomando en cuenta lo anterior, los humedales deben considerarse como elementos articuladores del territorio, y por tanto deben hacer parte integral de la gestión territorial. El ordenamiento y la gestión del territorio permiten que los objetivos de conservación sean claramente establecidos, y los medios e instrumentos con los cuales se va a efectuar y a monitorear, específicamente establecidos. Los sistemas de información geográfica permiten ahondar en el conocimiento del territorio, para especificar objetivos, generar y evaluar alternativas, y para finalmente elaborar y controlar la aplicación de planes específicos. (Sendra and García, 2000). Los Sistemas de Información Geográfica presentan un amplio universo de opciones, que permiten la clara incorporación de los recursos naturales y el ambiente en análisis regionales (Martín and Nieva, 1998). La principal restricción que presenta el uso de los SIG para el ordenamiento del territorio es la ausencia de información adecuada para la escala de trabajo, y en muchas ocasiones la ausencia total de la misma (Sendra and García, 2000).

Con respecto a los inventarios de humedales, insumo básico para su inclusión en el ordenamiento del territorio, se ha encontrado que en muchas instancias la información existente es incompleta, requiriéndose el uso de técnicas que puedan llenar los vacíos existentes en los inventarios de línea base. Entre ellos se encuentran el sensoramiento

remoto y los SIG (Rebelo et al., 2009). Los mismos autores, mencionan el impacto negativo que la mala calidad de los datos puede tener en la conservación de los humedales. Por lo anterior, debe buscarse que la información tenga un carácter científico y estandarizado, y que permita su utilización en posteriores inventarios. Un inventario pierde su utilidad rápidamente si no se efectúan repeticiones que permitan constatar cambios en el estado de los humedales, tanto en el tiempo como en el espacio (Finlayson and Van der Valk, 1995).

JUSTIFICACIÓN

A escala local, el Municipio de Pereira (ubicado en el Departamento de Risaralda, Colombia) depende exclusivamente del río Otún como fuente abastecedora para su sistema de acueducto. Esto confiere una particular importancia a los humedales de su cuenca media y alta, en términos de reguladores del recurso hídrico (Duque et al., 2008).

En el año 2005 se efectuó, por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira (Colombia), el *inventario y caracterización de los humedales de la cuenca media y alta del río Otún*; el ejercicio consistió, fundamentalmente, en la identificación y jerarquización sistémica de humedales, y en la evaluación de sus atributos, bienes, servicios y factores de cambio identificados, resumiéndolos en impactos, valores y estado, utilizando una escala cualitativa-cuantitativa, es decir, una escala numérica evaluando el estado de los diferentes elementos allí encontrados, así como su grado de intervención humana. (Duque et al., 2008).

Los resultados del trabajo fueron organizados en una matriz, y cartografiados utilizando el IDW (*Inverse Distance Weighting*). El proceso de selección y aplicación de la técnica no estuvo apoyado en la reflexión sobre la naturaleza de los datos, ni tuvo en cuenta aspectos

como la presencia de tendencias y estructuras en los mismos. La ausencia de soporte analítico al momento de elaborar los mapas, constituye una dificultad en cuanto a la calidad de los datos generados. Esta dificultad debe ser superada, si se quiere establecer una base de conocimiento sólida desde el punto de vista científico, que permita estandarizar el monitoreo de humedales a futuro, en la cuenca del río Otún. La adecuada interpretación de la información generada en el inventario de humedales es un insumo clave para el ordenamiento de la cuenca, que abastece actualmente una población cercana a los 500.000 habitantes y se constituye al mismo tiempo en motor de las actividades humanas que se realizan en el municipio de Pereira.

1.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo varían espacialmente los impactos sobre los ecosistemas de humedal en la cuenca alta del río Otún?

¿Qué elementos metodológicos, desde el punto de vista de la geoestadística, deben tenerse en cuenta para el diseño de inventarios de humedales óptimos que reflejen de manera competente y relevante las condiciones físicas y ambientales del territorio?

¿Qué algoritmo de interpolación espacial es el más adecuado para el análisis de datos, en el contexto de los inventarios de humedales, para la gestión del recurso hídrico y los ecosistemas?

1.2 ALCANCE

El presente trabajo plantea la realización de un análisis geoestadístico de la información existente, sobre los impactos que actualmente reciben los humedales en la cuenca alta del río Otún. Esto permitirá, por un lado, dar un carácter científico a la información levantada,

con el fin de llenar vacíos que puedan causar una pérdida de relevancia del inventario; y por otro, depurar la línea base que podrá utilizarse como referencia en futuros ejercicios de inventario. El propósito último es generar insumos para la inclusión de los humedales en los procesos de toma de decisiones y generación de políticas locales con relación al recurso hídrico en la cuenca del río Otún.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 HUMEDALES

Aunque no existen una definición unificada para el concepto de humedal, sí existe un acuerdo general en cuanto a la identificación del agua como principal factor regulador de la vida en estos ecosistemas (Zedler and Kercher, 2005). La definición de humedales adoptada por Cowardin et al. reconoce las condiciones hidrológicas que determinan la presencia de humedales, y propone además la presencia de vegetación hidrofítica como indicador fácilmente observable. Hace énfasis en las características transicionales entre ambientes húmedos y secos que con frecuencia se presentan en los mismos (Cowardin et al., 1979). Esta definición da cuenta de tres elementos primordiales que según la USDA (US Department of Agriculture) determinan que un área dada se considere como humedal: condiciones hídricas, de vegetación y de suelos.

Las zonas húmedas son zonas de transición entre sistemas terrestres y acuáticos donde el nivel freático está generalmente en o próximo a la superficie o la zona está cubierta por agua poco profunda. Las zonas húmedas deben tener uno o más de los siguientes tres atributos: (1) Al menos periódicamente el suelo soporta predominantemente hidrófitas; (2) El sustrato es predominantemente suelo hídrico no drenado; y (3) El sustrato no es suelo y está saturado con agua y cubierto por agua poco profunda, alguna vez durante el período de crecimiento de cada año.

El texto de la Convención de Ramsar es amplio e inclusivo, y enumera taxativamente la diversidad de condiciones que por parte de la misma son considerados como humedales (Ramsar Convention Secretariat, 2013).

“las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

2.2 IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES

Los humedales son ecosistemas importantes para el hombre, al punto de ser considerados un recurso, debido a la cantidad de beneficios que se obtienen de su funcionamiento ecológico (Zedler and Kercher, 2005). Según se estableció en la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, los humedales proporcionan al hombre una amplia gama de servicios ecosistémicos que contribuyen al bienestar humano; como provisión de alimento y materiales vegetales, abastecimiento y depuración de agua, regulación del clima, control de inundaciones, protección de costas, oportunidades de recreación y turismo, entre otras (Finlayson et al., 2005).

Los valores de los humedales se derivan de su función ecológica, y de los beneficios que la misma representa para las actividades humanas. Las principales funciones ecológicas son las relacionadas con el flujo y almacenamiento hidrológico, la productividad biológica, el soporte de ciclos biogeoquímicos, la descomposición, y la provisión de hábitat. (Richardson, 1994). Las funciones ecosistémicas están ligadas directamente a su tipología, y a sus componentes estructurales. La capacidad funcional de un ecosistema de humedal, definida como su potencial para realizar funciones ecológicas (que posteriormente se pueden derivar en valores), depende del paisaje que lo rodea (Mitsch and Gosselink, 1993; Smith et al., 1999). Las funciones ecosistémicas de los humedales, y por lo tanto sus valores, dependen de su estructura. Estas funciones y estos valores operan a escalas espaciales y temporales diferentes (Mitsch and Gosselink, 2000) de manera que los beneficios de los humedales para el ser humano trascienden, en muchas ocasiones, las fronteras de su propia comprensión. Se ha establecido que los componentes hidrológicos son clave dentro de los humedales, al

determinar la mayor extensión de las funciones ecosistémicas (Maltby and Acreman, 2011).

2.3 FACTORES DE CAMBIO

Se estima que a pesar de los servicios que prestan, más de la mitad de los humedales de la tierra han sido eliminados (LePage, 2011). La conversión y la modificación de los humedales, así como el cambio surgido de la influencia del paisaje, afectan negativamente las funciones de los humedales, reduciendo o eliminando, en consecuencia los beneficios que los mismos proveen al hombre (Tiner, 2005). Lo anterior se puede evidenciar en la reducción de la oferta hídrica en calidad y cantidad, que en algunos países ya se expresa como una crisis de escasez, y en otros se avizora como un evento previsible en la próxima década. Se ha determinado la destrucción ecológica de los ecosistemas acuáticos como una de las causas de pérdida de acceso al recurso hídrico a escala mundial (Srinivasan et al., 2012). Nyman ha dividido las funciones ecosistémicas de los humedales según el área en que es perceptible el beneficio para el hombre. Ha establecido, en este contexto, que las funciones más importantes, como aquellas relacionadas con la regulación hídrica, sólo son apreciables fuera del predio, en una escala geográfica amplia (Nyman, 2011). Esta puede ser una de las razones que definen la naturaleza del conflicto ambiental que rodea los humedales.

Las actividades agropecuarias y de urbanización figuran dentro de las principales causas de desaparición de humedales (Gutzwiller and Flather, 2011), a ellas se asocia una serie de impactos como los mencionados por (Naranjo et al., 1999) para los humedales, para Colombia (Tabla 1). Actualmente el panorama no presenta cambios significativos en

cuanto a la composición del listado, ni en la ocurrencia de los impactos, en mayor medida.

Tabla 1. Síntesis de conflictos que derivan en pérdida de humedales en Colombia.

SÍNTESIS DE CONFLICTOS DE ORDEN DE MAGNITUD 1		
Transformación Total		
Proceso	Sector y Tipo de Acción	Resultado
Reclamación de tierras o suelos agrícolas	Agrícola y ganadero. Acciones individuales de propietarios, acciones colectivas de grupos de productores, o gobiernos regionales y locales, acciones del estado en general.	Desaparición del humedal. Corresponde a lo que comúnmente se conoce como “desección” o drenaje, o “adecuación de tierras” mal llamadas “mal drenadas”.
Alteración completa de regímenes hidráulicos en las cuencas que alimentan el (los) humedal (es)	Hidroenergético: (construcción y operación de represas). Agrícola y ganadero: cambios severos en la cobertura vegetal y capacidad de retención de agua en la cuenca aportante. Cambios en la carga de sedimentos.	Alteración de las funciones del humedal, especialmente en su carácter “pulsante”, por menor oferta de agua o por regulación de la misma, por aumento de carga de sedimentos o nutrientes. Desencadena procesos de sucesión vegetal y colmatación, que en un plazo corto cambian la estructura funcional y los valores del humedal. Altera la dinámica natural de creación/destrucción de los sistemas en el paisaje.
SÍNTESIS DE CONFLICTOS DE ORDEN DE MAGNITUD 2		
Transformación Severa		
Proceso	Sector y Tipo de Acción	Resultado
Control de inundaciones	Agrícola y ganadero. Acciones individuales de propietarios, acciones colectivas de grupos de productores, o gobiernos regionales y locales, acciones del estado en general.	Alteración del régimen hidrológico del humedal individual, lo cual conlleva cambios en las funciones y valores del mismo.
Introducción o transplante de especies invasoras	Piscícola, agropecuario y particular. Liberación accidental o deliberada de especies, con el fin de aumentar en el corto plazo la producción de proteínas en los cuerpos de agua	Cambio en la estructura y composición de las comunidades bióticas acuáticas. Eventual pérdida de biodiversidad. Cambios ecosistémicos difíciles de predecir.
Contaminación	Agrícola, Minero, Urbano, Industrial. Vertimientos o lavado de nutrientes y sustancias tóxicas en las aguas que alimentan el humedal.	Alteración de las funciones del humedal, especialmente las biológicas en los procesos de “eutroficación”.
Canalizaciones	Forestal. Sistemas de aprovechamiento (Extracción) en humedales forestales (Kativales, Guandales, etc.), que implican la construcción de canales para el arrastre de la madera.	Cambios en los procesos de sucesión biológica y en los patrones de regeneración de especies dominantes, lo cual termina cambiando la fisionomía y funcionamiento del humedal, así como sus valores.

Urbanización	Urbano, industrial y de recreación (turístico). Cambios en el uso de la tierra en inmediaciones del humedal.	Cambios en la estructura hidráulica y biológica en áreas sensibles de los humedales, o de transición hacia los sistemas terrestres, lo cual altera funciones biológicas principalmente.
Remoción amplia de sedimentos o vegetación	Transportes. Mediante el dragado de cursos o cuerpos de agua, con el fin de mejorar la navegabilidad. Algunas explotaciones mineras en los lechos de humedales.	Altera la estructura y funciones específicas de humedales, especialmente palustres. Su efecto puede ser benéfico si es puntual, pero negativo si cubre la totalidad del humedal
Sobreexplotación de recursos biológicos	Caza, pesca, extracción de materiales para industrias locales (artesanías, autoconsumo).	La sobreexplotación, cuando se da en una magnitud grande, puede conllevar la alteración de condiciones ecológicas y valores de los humedales, especialmente si las especies afectadas son "claves". (sobre las cuales se mantienen otras especies o procesos ecológicos)
Represamiento o inundación permanente	Represamiento (Acuicultura, recreación).	Las funciones ecológicas típicas del humedal se modifican, de tal suerte que corresponden después de la acción a las de otro tipo de humedal, que casi siempre puede ser artificial"

Fuente: (Naranjo et al., 1999).

En el área de estudio, los principales impactos encontrados se relacionan con actividades agrícolas y ganaderas, incluso al interior de áreas protegidas nacionales y regionales, así como en previos privados dedicados a la conservación. Los conflictos de uso del suelo que se presentan en la zona tienen estrecha relación con problemas de vigilancia y gestión del territorio, ante prácticas culturales que se realizan en la zona (p.e. ganadería) (Duque et al., 2008). Gran parte de los conflictos ambientales en torno a los humedales, se deben a dificultades para que éstos sean incorporados de forma adecuada en las políticas de conservación o uso del suelo. Es clave argumentar desde el punto de vista de los costos ambientales si se quiere desbloquear el tema en los ambientes de toma de decisiones y elaboración de políticas. (Maltby, 1991).

2.4 INVENTARIOS DE HUMEDALES

Entendiendo los humedales como un recurso crítico para el hombre, es lógico que su gestión y conservación deba iniciarse con un ejercicio de inventario. La información levantada mediante inventarios de humedales es el punto de partida para un proceso de planificación y gestión integral a múltiples niveles, desde el regional hasta el internacional. La información aportada por los inventarios de humedales es útil para señalar prioridades de conservación, establecer una línea base de monitoreo ecológico de los humedales, promover el conocimiento público de los mismos, e intercambiar y comparar información entre sitios y regiones. De la misma forma la información generada es importante para la valoración económica de los humedales y como base para la toma de decisiones con respecto a la utilización de sus recursos (Finlayson and Van der Valk, 1995).

Finlayson y Mitchell (1999), hablan sobre la necesidad de establecer métodos para levantar y manejar la información referente al inventario y monitoreo de humedales, y subrayan la importancia de dar un tratamiento científico adecuado a la información, como una forma de lograr una mayor aceptación en la comunidad científica y en los administradores, de manera que se pueda lograr un mayor impacto en la conservación de los mismos. Se enfatiza en el rigor necesario para el levantamiento de información, así como para el monitoreo prolongado del estado de los humedales.

Tiner (2005), muestra cómo con base en la información generada por el Inventario Nacional de Humedales de Estados Unidos, se puede evaluar la pérdida acumulativa de los atributos de los humedales a escala de cuenca hidrográfica. El ejercicio incluye el

uso de información geográfica, de la cual puede derivarse información aplicable al proceso de predicción de la pérdida de humedales por efectos antrópicos.

Una base de información adecuada y con un análisis relevante, tendrá utilidad en la tarea que propone McInnes (2011, 2007) como urgente, la de comprender a los humedales como elementos con una realidad social y económica, más allá del mero fenómeno ecológico. Este enfoque multidisciplinario puede representar la viabilidad de los esfuerzos de conservación de los ecosistemas a futuro (McInnes, 2011, 2007).

En su revisión sobre métodos para el monitoreo de humedales, Cole y Kentula (2011), resaltan la necesidad de poner mayor esfuerzo en los monitoreos, tras la realización de inventarios, y describen múltiples técnicas que permiten monitorear los tres elementos principales (hidrología, vegetación y suelos), en una sola visita a los humedales.

Es de suma importancia que los actores gubernamentales cuenten con información adecuada para el proceso de toma de decisiones en torno al ordenamiento y conservación de los humedales, proveniente de buenos ejercicios de inventario y su correspondiente análisis científico. Esto lo que hará que los procesos de toma de decisiones sean más transparentes y tengan mejores resultados (Clare and Creed, 2013).

2.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADOS AL ESTUDIO DE LOS HUMEDALES

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) puede ser definido como un tipo especial de sistema de información, que no sólo lleva registro de los eventos, actividades y cosas, sino también de dónde esos eventos, actividades y cosas suceden o existen (Longley et al., 2005). Para Olaya, (2011), los SIG son sistemas complejos que integran

Hardware, Software, Personas e Información Geográfica, con la función de capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados. Los SIG son fundamentales para el inventario y caracterización de humedales, dadas sus características y las posibilidades que ofrecen, tanto para la captura como para el análisis de la información. La capacidad de los SIG para generar modelos que pueden ser incluso de simulación, haciendo uso de aplicaciones estadísticas. (Lyon, 2001).

Pueden identificarse diferentes usos de los SIG enmarcados en la temática de los humedales. La mayor parte de ellos consiste en el uso de sensoramiento remoto como medio tanto para identificar humedales, como para cuantificar su área e incluso para determinar su estado y calidad en funciones ecosistémicas. Un ejemplos de este tipo de estudio es el de (Chopra et al., 2001)), trabajo en el que se utilizaron imágenes LANDSAT con el fin de generar mapas de cobertura y uso de la tierra, extensión de zonas inundadas, turbidez del agua y amenazas para el humedal, entre otros. Otro ejemplo (Rebelo et al., 2009), muestra la utilización de sensores remotos de diferentes momentos (1997-2007) para observar cambios en los usos del suelo y sus efectos en los humedales de la costa de Sri Lanka. En el mismo humedal se hizo posteriormente un análisis visual, que tuvo mejores resultados que la clasificación supervisada de la imagen satelital (Nagabhatla et al., 2012).

La geoestadística o estadística espacial, es una rama de la estadística, especializada en el análisis de datos que se encuentran referenciados geográficamente (Hengl, 2009). La geoestadística calcula estimaciones dentro de un contexto regido por un fenómeno natural con distribución en el espacio y, de esa forma, supone que los valores de las variables distribuidas espacialmente, que se consideran como *variables regionalizadas*,

están espacialmente correlacionadas. Debido a esa característica, su aplicación ha sido amplia, principalmente para efectuar estimaciones o simulaciones del comportamiento de variables en áreas a partir de puntos muestreados. En general, la geoestadística busca extraer de una aparente aleatoriedad de los datos levantados, la estructura probabilística del fenómeno regionalizado, esto es, la variación de los datos dependiente de su ubicación en el espacio. (Landim and Sturaro, 2002). Una definición formal, sitúa a la geoestadística como *el estudio de las variables numéricas que se encuentran distribuidas de manera dependiente en una determinada posición del espacio*. (Chauvet, 1994). El argumento de la dependencia espacial es la clave para la aplicación de la geoestadística a cualquier fenómeno con una expresión espacial, incluyendo aplicaciones como las arqueológicas (Castillejo, 2007).

Según (Moral García, 2004) La geoestadística es una herramienta imprescindible cuando se desea analizar los patrones de distribución espacial de las variables ecológicas y medioambientales a partir de muestreos realizados en el área de interés. Asimismo, los procedimientos de estimación geoestadísticos, conocidos como "krigeado", permiten la realización de las "mejores interpolaciones" en aquellos lugares donde no se conoce la magnitud del atributo investigado.

La geoestadística comprende un conjunto de herramientas y técnicas, útiles para el cumplimiento de sus fines, son según (García, 2004), las siguientes:

1. Análisis exploratorio de datos: Consiste en el estudio general de los datos, sin tener en cuenta su distribución geográfica. El fin es la comprobación de su consistencia y la identificación de la distribución a la que se ajustan.

2. *Análisis estructural*: Estudio de la continuidad de la variable mediante el cálculo del variograma u otra función, que muestra cómo es la variación espacial de la variable. Se efectúa ajuste a un variograma teórico.

3. *Predicciones*: Se obtienen estimaciones de la variable en puntos no muestrales, considerando la correlación de la estructura de datos, integrando la información de puntos muestrales y la información obtenida a partir de tendencias conocidas.

El Kriging es un grupo de técnicas geoestadísticas, diseñadas para interpolar el valor de un campo aleatorio en puntos no observados, derivado de su valor en puntos cercanos. La variación espacial es calculada con un semivariograma o variografía, que es una gráfica que describe las características de variación de la variable regionalizada. En revisiones de bibliografía, Li y Heap (2011), encontraron la existencia de 72 métodos o sub-métodos de interpolación espacial. Los métodos usados con mayor frecuencia fueron *Inverse Distance Weighted* (IDW – Inverso de la distancia ponderado, por sus siglas en inglés), *Kriging Ordinario* y *Co-Kriging Ordinario*.

En el marco de la necesidad de dar un tratamiento científico objetivo a los datos levantados en inventarios de humedales, así como en monitoreos y otros estudios relacionados, la geoestadística es una de las mejores formas de trabajar con datos dispersos en relación con los humedales. Nogueira et al. (2002), emplearon diferentes métodos geoestadísticos para la evaluación de la vegetación en los humedales del Mato Grosso, enfoque relativamente frecuente para el uso de la estadística espacial en relación con los humedales. En el mismo sentido, se encuentra el estudio realizado por Arieira et al., (2011), que elaboraron un modelo que toma al mismo tiempo sensores remotos y datos puntuales obtenidos en parcelas de vegetación, para generar mapas

corregidos de la vegetación en los humedales. A una escala geográfica más amplia, Yang et al. (2012), utilizan la geoestadística (Kriging ordinario) para explorar las Cuencas para la Retención Sostenible De Inundaciones (SFRB¹, por sus siglas en inglés), trabajando con información para 40 variables obtenida en toda Escocia.

Como alternativa al trabajo geoestadístico, se encuentra el proceso de evaluación de funciones ecosistémicas para soportar la toma de decisiones, llevado a cabo por Janssen et al. (2005), que efectuaron una clasificación en unidades hidrogeomórficas y funcionales al interior del humedal, teniendo en cuenta aspectos desde una escala 1:1000, con lo cual obtuvieron unidades de análisis que posteriormente sirvieron para efectuar análisis espaciales no estadísticos. Llama la atención que estos autores utilizaron una categorización de las variables medidas en los diferentes humedales.

¹ SFRB: Sustainable Flood Retention Basin (Yang et al., 2012).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Generar información óptima para la gestión de los humedales de la cuenca alta del río Otún (Risaralda, Colombia) mediante el uso de tecnologías para el análisis espacial de la información geográfica.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Depurar y reinterpretar la información existente con respecto a los impactos sobre los humedales en la cuenca alta del río Otún.
- Efectuar el análisis geoestadístico de la información sobre impactos recibidos por los humedales en la cuenca alta del río Otún.
- Evaluar las metodologías de análisis espacial y geoestadístico utilizadas para analizar los datos del inventario de humedales de las cuencas media y alta del río Otún.

4 METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos propuestos, la presente investigación se realizó por medio de los siguientes pasos.

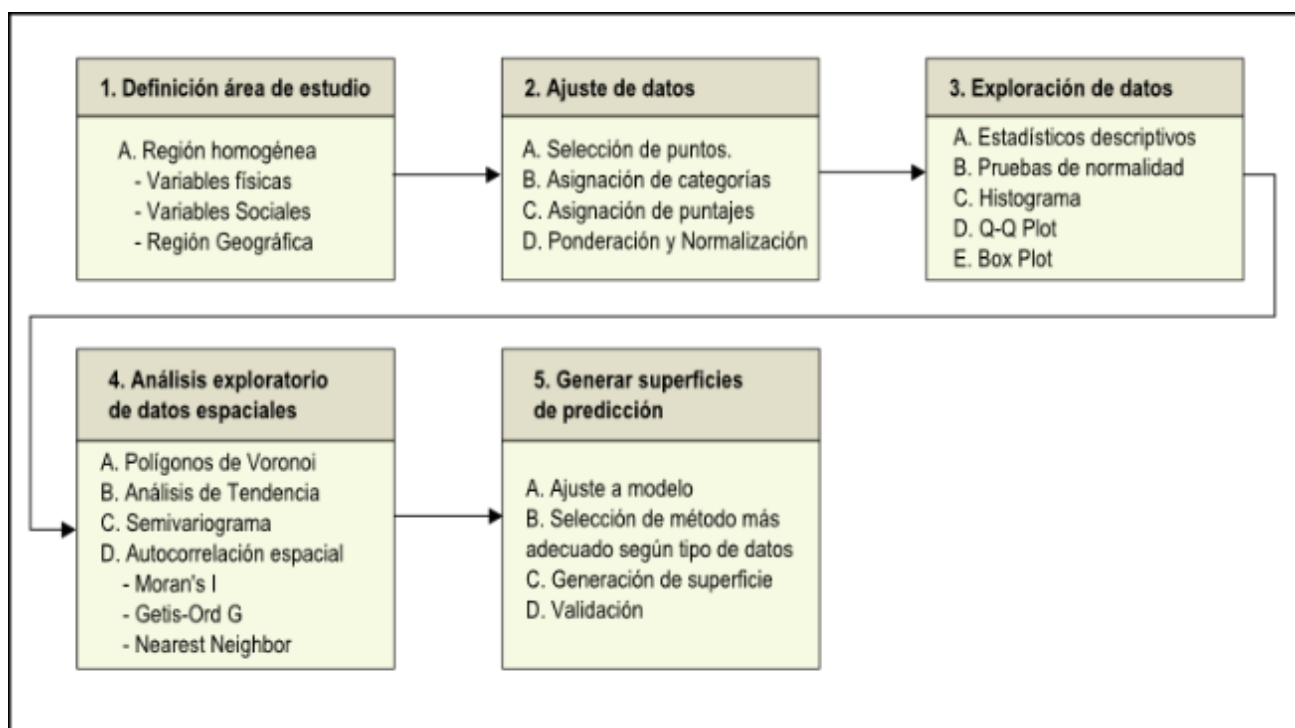


Figura 1. Esquema metodológico.

4.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Consideraciones para la elección del área de estudio

Es importante resaltar que en geoestadística el propósito esencial es la interpolación y si no hay continuidad espacial pueden hacerse predicciones carentes de sentido. (Giraldo H., 2003). Desde este punto de vista, la *variabilidad estacional* puede alcanzarse exclusivamente desde una perspectiva *intra-sitio*. Si aplicamos esto a los humedales y al

área de estudio del presente trabajo, la geoestadística sería aplicable al interior de cada humedal y no entre humedales, es decir, ésta se aplicaría a datos levantados en puntos dentro de cada humedal, para interpolar datos aplicables a ese humedal estrictamente. En este sentido, es importante revisar el concepto de espacio, como antecedente para considerar la continuidad espacial en espacios diferentes al físico, y pasar a planos como el del espacio geográfico, donde el espacio ambiental es un concepto subyacente.

Lo anterior puede comprenderse de mejor manera si entendemos que el *espacio físico* es un continuo de discontinuidades (Castillejo, 2007), que son el límite o la interfase que cierto proceso causal ha generado sobre determinada materialidad. Éste corresponde a regiones claramente delimitables, por la diferencia entre una realidad física y otra. Esto implica la existencia de condiciones de estacionariedad, es decir, la presencia de condiciones más parecidas entre puntos cercanos que entre puntos lejanos. Por otro lado, el concepto de espacio geográfico, es la consecuencia de la superposición de las actividades sociales en el espacio físico, es decir, es el espacio físico apropiado por un conjunto social, incluyendo las relaciones sociales de producción (Castillejo, 2007). El espacio geográfico, pues, incluye una serie de condiciones ambientales, resultantes de la interacción entre espacio físico (natural) y espacio social, lo que incluye tanto el constructo socio-cultural como los elementos construidos en el proceso de adaptación al medio. Según el autor, los conceptos de *paisaje*, *territorio* y *espacio construido* son conceptos ligados al espacio geográfico.

El área de estudio, entonces, se delimitó en la cuenca alta del río Otún, más exactamente en la zona de páramo, utilizando como límite la curva de nivel de 3250 m.s.n.m. Comprende desde zonas de subpáramo, cercanas a la línea de árboles, hasta las nieves perpetuas del nevado de Santa Isabel, a 4900 m.s.n.m. La decisión de tomar la curva de 3250 m.s.n.m. como cota inferior de la zona de estudio se debe a que ésta, en la vereda El Jordán, delimita

un espacio geográfico homogéneo, con condiciones ambientales similares. Esto es, condiciones de adaptación de una población humana a las condiciones ambientales. Es importante aclarar que esta decisión permite efectuar los análisis sobre una superficie geográfica continua. El monitoreo de impactos sobre los humedales, todos ellos de origen antrópico, dará cuenta, entonces, de la relación sociedad – naturaleza que define el espacio geográfico.

En la Figura 2 se observa la delimitación del área de estudio en un contexto regional.

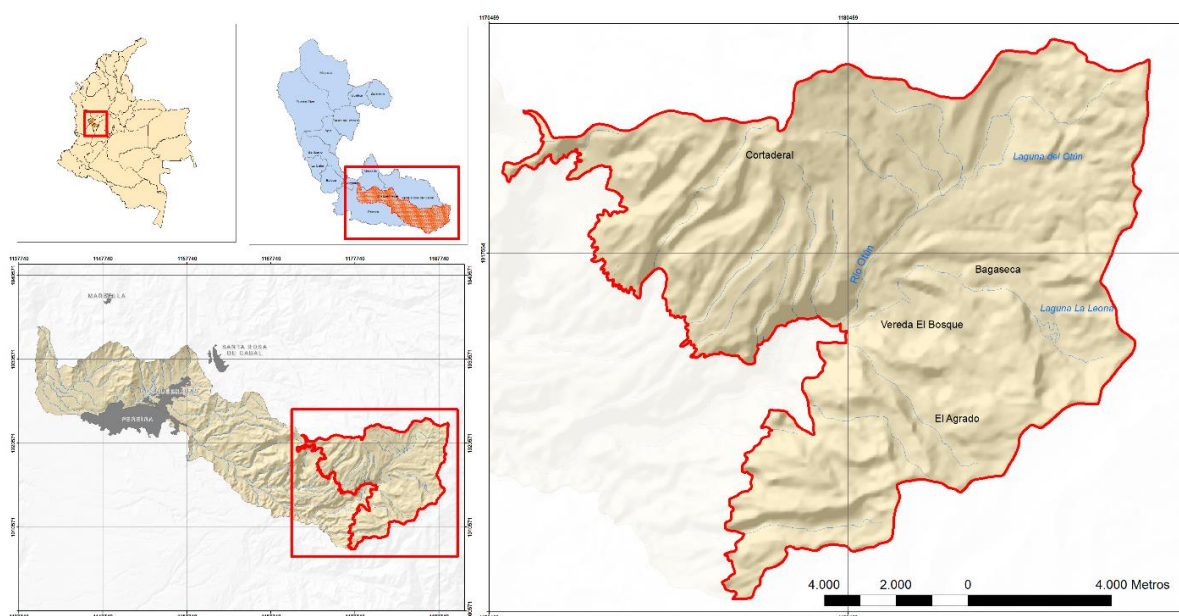


Figura 2. Ubicación y delimitación del área de estudio. Izquierda arriba: República de Colombia y Departamento de Risaralda. Izquierda abajo, cuenca hidrográfica del río Otún. Derecha, área de estudio.

4.1.1 ASPECTOS GENERALES

La cuenca alta del río Otún se encuentra ubicada sobre la vertiente occidental de la cordillera central colombiana, haciendo parte del Parque Nacional Natural Los Nevados. Cuenta con un área de 14.165 Has. y su altitud oscila entre los entre 3250 msnm en el sector de El Jordán y los 4900 m.s.n.m. en el Nevado de Santa Isabel.

La importancia de la cuenca gira en torno al mantenimiento del caudal de numerosos ríos y quebradas, afluentes del Río Otún, el cual es la principal fuente abastecedora del sistema de acueducto del municipio de Pereira.

El acceso a la cuenca se hace tomando la vía que de Pereira conduce, paralela al río Otún hasta el sector de El Cedral, continuando por un camino de herradura hasta la Laguna del Otún.

4.1.2 ASPECTOS FÍSICOS

El comportamiento climático en el área de estudio está determinado por la circulación de la atmósfera en el trópico, que define dos períodos lluviosos al año con máximos en Abril y Octubre y por las características del relieve, las cuales determinan el cambio de las lluvias con la altura de tal manera que a una elevación aproximada de 2000 msnm. las lluvias son del orden de 2500 mm/año; disminuyendo a partir de esta altura progresivamente hasta alcanzar promedios de 1000 mm/año a 4500 msnm.

La humedad relativa está directamente relacionada con la precipitación de manera que en los meses lluviosos la humedad adquiere valores altos. De forma inversa el brillo solar es elevado en los meses menos lluviosos. La temperatura media anual oscila entre los 14° y 18° centígrados.

Las formaciones geomorfológicas del área de estudio son el resultado de la acción volcánica del Nevado de Santa Isabel y del Paramillo de Santa Rosa, la cual asociada a los deshielos producidos por dichos fenómenos ha cubierto las rocas más antiguas del área generando los rasgos que se pueden apreciar hoy en día. Las grandes acumulaciones de flujos de lava definen zonas planas de extensión variable que están abruptamente cortadas o limitadas por cañones o valles muy estrechos, donde se desarrolla el drenaje. Los

piroclastos cubren estas planicies suavizándolas. En la Figura 3 se puede observar el flujo de lava que dio origen a la Laguna del Otún por el represamiento de un valle glaciar.

Otras veces los flujos de lava muy erosionados han evolucionado a cuchillas o filos alargados, limitados a lado y lado por escarpes verticales; generalmente estos flujos subyacen paquetes de rocas metamórficas, sedimentarias o estas tienen solo como cubierta el material piroclástico. En consecuencia los valles disectados sobre estas rocas son estrechos, en v muy cerrada, y profundos (CARDER, 2000).

Los suelos del área se formaron a partir de cenizas volcánicas y otros piroclastos de composición predominantemente andesítica – dacítica – riolítica, son suelos jóvenes en los que la descomposición de la materia orgánica es lenta; por lo tanto son suelos orgánicos clasificados como Andisoles (Florez, 2000).

La mayoría de los drenajes de la cuenca pertenecen al tipo dendrítico y subparalelo, y se encuentran en las partes donde las pendientes son más fuertes. Todas las corrientes de la zona son perennes, incrementando sus caudales durante períodos ya sea de fuertes precipitaciones o de prolongadas lluvias, adicionalmente, la cuenca posee un sistema complejo de humedales que ayudan entre otras cosas a la regulación de los caudales y la provisión de recurso hídrico en las temporadas secas.

El comportamiento de los caudales está íntimamente vinculado con el régimen de las lluvias y con la dinámica geomorfológica. La primera determina que los mayores caudales ocurran en los períodos de máximas precipitaciones y las descargas mínimas se produzcan durante los meses menos lluviosos. Por su parte la geomorfología incide en su comportamiento torrencial y en la ocurrencia de crecientes con cierta regularidad hecho particularmente importante desde el punto de vista de las amenazas naturales.



Figura 3. Flujo de piroclastos del nevado de Santa Isabel que dio origen a la Laguna del Otún. Estos flujos fueron de gran importancia en la formación del paisaje en la cuenca alta del río Otún. Foto: Santiago Restrepo C. (2005).

4.1.3 ASPECTOS BIOLÓGICOS

La cuenca alta del río Otún ha sido de mucho interés para la investigación en biodiversidad y conservación, principalmente por sus características ecológicas especiales y la accesibilidad en términos logísticos; A pesar de esto, la alta diversidad biológica de la cuenca está aún por descubrirse.

La diversidad biológica de la zona corresponde a la típica de bosques de alta montaña de la región neotropical con un alto registro de especies tanto de fauna como de flora. Se destacan grupos importantes como las aves con alrededor de 400 especies, las mariposas con cerca de 130 especies y un pequeño grupo de grandes mamíferos como la Danta de Montaña (*Tapirus pinchaque*), el Oso de Anteojos (*Tremarctos ornatus*) y el Puma o León de Montaña (*Felis concolor*).

La formaciones vegetales más importantes siguiendo a (Cuatrecasas, 1958), corresponde a Bosques Altoandinos y Paramos.

En el contexto biogeográfico, la cuenca alta del río Otún forma parte del trópico andino, el cual ha sido reconocido como de importancia global por su alta biodiversidad, gran número de endemismos y el considerable grado de amenaza a sus ecosistemas (Mittermeir et al., 1998).

4.1.4 ASPECTOS SOCIOECONOMICOS

El proceso de ocupación y tenencia de la tierra de la cuenca media y alta del río Otún se desarrolló por la invasión de terrenos baldíos, por flujos migratorios a comienzos del siglo XX, de gentes originarias de Antioquia y posteriormente de Boyacá, Cundinamarca y Tolima en busca de tierras para desarrollar actividades agropecuarias. El periodo de ocupación más intensivo se llevó a cabo hace aproximadamente 70 años por los valles de los ríos Otún y Barbo. Las zonas accesibles fueron taladas en procesos de extracción de carbón y el posterior establecimiento de cultivos temporales, para luego convertirse en potreros para ganadería de tipo extensivo, actividad que llevo a la tala de más bosques (Londoño, 1994). Estas migraciones resultaron en los asentamientos conocidos hoy como La Florida en la cuenca media, la vereda La Suiza en la cuenca media-alta y la vereda El Bosque en el páramo.

Hoy, las principales actividades económicas de la zona son la agricultura y la ganadería, esta última más acentuada en las partes altas, lo que indiscutiblemente ha llevado a un mayor deterioro de los ecosistemas intervenidos. En cuanto a la tenencia de la tierra, se ha venido dando un proceso de adquisición de tierras por parte de entidades y organizaciones interesadas en la conservación como la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira,

la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN) entre otras.

4.1.4.1 FUENTE DE DATOS

Los datos que utilizados en el presente trabajo, provienen de evaluaciones cualitativas, organizadas en niveles cuantificables, tanto para valores y atributos, como para impactos y factores de cambio derivados principalmente de factores antrópicos. En este aspecto, se encontró que experiencias como la de (Gutzwiller and Flather, 2011), donde fue utilizado un método de estadística espacial (splines de regresión adaptativa multivariada), obteniendo datos a partir de escalas cuantitativas derivadas de observaciones cualitativas, lo que en términos generales resume la intención de esta investigación.

Un fundamento para este artículo es el trabajo de (Legendre, 1993), que aborda el problema de la autocorrelación espacial en los datos ecológicos, desarrollando métodos para evaluar la independencia de los datos cualitativos, apuntando a uno de los obstáculos más frecuentes a la hora de aplicar estadística espacial a variables naturales, donde la autocorrelación es común. En este sentido, (Ruiz et al., 2009) establecen una prueba estadística que permite establecer la independencia de datos cualitativos, de gran importancia para trabajos como el mencionado anteriormente (Legendre, 1993).

4.1.4.2 LEVANTAMIENTO DE LOS DATOS

Dado que resulta de utilidad conocer el origen de la información con la que aquí se trabajará, se ha considerado conveniente hacer una revisión sobre el proceso de obtención de la información. Ésta fue levantada en campo en 2005, por parte de un equipo multidisciplinario de cinco personas, compuesto por expertos en humedales (un biólogo y dos administradores ambientales) y por profesionales de la Empresa de Acueducto y

Alcantarillado de Pereira S.A. E.S.P. (un biólogo y un ingeniero sanitario), lo que permitió tener apreciaciones que tuvieron en cuenta diversos puntos de vista, y decisiones concertadas en torno a las calificaciones para atributos e impactos presentes en los humedales.

La metodología utilizada se adoptó de acuerdo a las recomendaciones hechas por la convención de RAMSAR en un documento técnico, presentado en la 8ª Conferencia de las Partes Contratantes, en Valencia España en diciembre de 2002. La metodología fue probada durante el Inventario y Caracterización de los Humedales del Parque Nacional Natural los Nevados y Zona Amortiguadora en los Departamentos de Caldas y Risaralda (Duque et al., 2002), con base en la cual se hicieron adaptaciones (Restrepo et al., 2005).

Tomando en cuenta las características del área de estudio, así como la escala requerida para su estudio, se abordó el diagnóstico de los humedales desde el enfoque de Sistema Ecológico (cuenca Otún). Cada sistema se organizó en Subsistemas (complejos de humedales) y Componentes (humedales) de acuerdo a los ejes articuladores de los elementos. A nivel de Complejo, se hizo el inventario y la caracterización de los humedales de toda la zona de estudio en cuanto a área, distribución y localización con georreferenciación a escala 1:25.000.

Durante el estudio, se realizó una descripción general a nivel de Complejo de humedales sobre su origen, extensión y vegetación del área de drenaje. Además de las funciones, productos, atributos y factores de cambio.

Los datos cualitativos fueron calificados en un rango que va desde 0 (ausente) hasta 3 (presencia fuerte), de acuerdo con la metodología utilizada por Restrepo y Bedoya. (Bedoya and Restrepo, 2001; Restrepo and Bedoya, 2008).

4.2 AJUSTE DE LA INFORMACIÓN

La reinterpretación de la información que se realizó consistió en tomar los datos existentes, levantados en campo por un grupo de expertos, tomando decisiones consensuadas acerca de las calificaciones cualitativo-cuantitativas. Las variables fueron evaluadas según su naturaleza con respecto al tipo de impactos del ecosistema. Aunque en el conjunto de datos existen valores tanto para los “valores” como para el “estado” de los humedales, éstos no fueron tenidos en cuenta, dado que se considera que el análisis por partida doble resulta redundante. Esta redundancia se fundamenta en que los impactos reducen los valores que pueden derivarse de los humedales. La misma lógica aplica, entonces, para un análisis de impactos y valores para llegar a estado, que sería una medida en gran medida dependiente de la redundancia ya mencionada.

Los impactos fueron ponderados dependiendo de si los impactos descritos afectan la hidrología y los suelos, el componente biológico o el componente de calidad del recurso hídrico en los humedales, o si el impacto afecta todas las anteriores. Con la ponderación se busca que la calificación refleje de mejor manera la realidad de los humedales en el momento en que fue levantada la información en campo.

La Tabla 2 muestra los impactos sobre los humedales que se tuvieron en cuenta como variables, las categorías en las cuales fueron agrupadas, y los pesos asignados a cada una de ellas, según el impacto que representan y la forma en que el mismo afecta las condiciones del humedal. La información que se presenta proviene directamente de la fuente de datos expuesta anteriormente. La ponderación de impactos se elaboró con base en el conocimiento de los mismos en campo y con soporte en la bibliografía (Mitsch and Hernandez, 2012; Naranjo et al., 1999; Zedler and Kercher, 2005). El factor que se obtiene al multiplicar los pesos asignados multiplica a su vez el valor correspondiente a cada

impacto para los diferentes puntos muestreados. Con la ponderación se busca que los puntajes asignados al total de impactos para cada punto refleje de una mejor manera las condiciones reales observadas. Adicionalmente se convierten los valores discretos obtenidos inicialmente (la suma de puntajes entre cero (0) y tres (3) para los diferentes impactos, en valores continuos, de tal manera que sea posible efectuar análisis estadísticos con la información. Después de la tabla se explica cada uno de los impactos.

Tabla 2. Tabla de ponderación de impactos.

CATEGORÍA	VARIABLES	PESO INDIVIDUAL (A)	PESO CATEGORÍA (B)	FACTOR MULTIPLICADOR (A*B)
Suelos e hidrología	Aporte de Sedimentos (APSED)	5	100	500
	Deseccación (DES)	10		1000
	Eliminación del Sustrato (ESUS)	10		1000
	Disposición de Estériles (DEST)	10		1000
Calidad del agua	Vertimientos Puntuales (VPUN)	8	5	40
	Vertimientos Dispersos (VDIS)	5		25
Procesos Biológicos	Eliminación Franjas de Protección (EFP)	8	10	80
	Presencia de Especies Invasoras (INVS)	10		100
Sistémicos	Fragmentación (FRAG)	10	100	1000
	Invasión de Animales Domésticos (INVD)	8		800

La calificación para cada sitio se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n \text{LOG}_{10} (V_i * A_i * B_i)$$

Finalmente, los resultados son normalizados dividiendo por el valor máximo obtenido, para lograr una escala de calificación fácilmente comprensible, entre el cero (0) y el uno (1).

4.2.1 Impactos Sobre Suelos e Hidrología

Esta categoría ha recibido el mayor peso de categoría (100 puntos), dado que son estos aspectos los que definen la naturaleza del humedal. Las afectaciones en la hidrología, logradas con frecuencia mediante cambios en el sustrato (remoción, drenaje) afectan las demás funciones en el humedal, llevándolo en ocasiones a puntos de no retorno, dado que los humedales no pueden asimilar con facilidad la mayor parte de los cambios introducidos. Para una descripción de los impactos, ver Tabla 3.

Tabla 3. Descripción de impactos sobre suelos e hidrología.

IMPACTO	DESCRIPCIÓN
Aporte de Sedimentos (APSED)	Impacto relacionado con la presencia de actividades alrededor del humedal, que por sus características generan erosión, que contribuye a la sedimentación del mismo
Desecación (DES)	Construcción de obras de drenaje que altera la función hidrológica del humedal, alterando la velocidad del drenaje y generando una depresión en el nivel del agua.
Eliminación del Sustrato (ESUS)	Consiste en la eliminación completa del suelo en el humedal. Se hace con el fin de construir estanques ornamentales o para la piscicultura
Disposición de Estériles (DEST)	Vertimiento de materiales estériles en el humedal con el fin de efectuar un relleno del mismo. La consecuencia más extrema es la desaparición del humedal.

4.2.2 Impactos Sobre la Calidad del Agua

El menor peso de categoría (5 puntos) fue asignado a esta variable. Esto se explica por la alta resiliencia que tienen los ecosistemas de humedal ante este tipo de impactos. Los impactos no son de carácter estructural, siempre y cuando los vertimientos no sean de carácter industrial, y no sobrepasen el volumen o el flujo de los humedales. Ver Tabla 4

Tabla 4. Descripción de impactos sobre calidad del agua.

IMPACTO	DESCRIPCIÓN
Vertimientos Puntuales (VPUN)	Vertimientos en los cuales es identificable un punto fijo, tal como una tubería, ducto o drenaje
Vertimientos Dispersos (VDIS)	Vertimientos derivados de actividades dispersas como la ganadera o la agropecuaria, en los cuales no es identificable un punto concreto para el vertimiento, sino un área de influencia.

4.2.3 Impactos Sobre Procesos Biológicos

Los procesos biológicos se refieren a las interacciones entre seres vivos, principalmente. Las afectaciones a los procesos biológicos tuvieron una puntuación intermedia, de 10 puntos. Estas afectaciones, en muchos casos, y en ausencia de impactos sobre la hidrología del humedal, pueden ser reversibles por procesos de sucesión ecológica. Estos impactos sin embargo, tienen un importante potencial, en términos de afectación a las funciones ecosistémicas del humedal en el largo plazo. Ver Tabla 5.

Tabla 5. Descripción de impactos sobre los procesos ecológicos.

IMPACTO	DESCRIPCIÓN
Eliminación Franjas de Protección (EFP)	Consiste en la eliminación de la interface que separa el humedal propiamente dicho, de las zonas secas. Estas franjas ofrecen protección contra las influencias externas que pueden dar lugar a efectos de borde. Su desaparición hace vulnerable al humedal
Presencia de Especies Invasoras (INVS)	Hace referencia a la invasión de especies, principalmente vegetales, que reduce la diversidad del humedal y cambia la estructura de su comunidad, lo que a largo plazo puede ocasionar cambios en la hidrología del mismo. La invasión de pastos o helechos del género <i>Azolla</i> son los principales ejemplos en el área de estudio.

4.2.4 Impactos Sistémicos

Los impactos sistémicos involucran aquellas afectaciones que se observan afectando al sistema como un todo. Estos impactos incluyen afectación a diferentes aspectos y elementos del ecosistema, de distintos tipos y de manera simultánea

IMPACTO	DESCRIPCIÓN
Fragmentación (FRAG)	La fragmentación es en realidad una consecuencia de otros impactos, como la desecación o la disposición de estériles. La fragmentación da lugar a una serie de problemas derivados de los efectos de borde, así como de la interrupción de los territorios de las diferentes especies allí presentes. Un humedal fragmentado es más susceptible a la desaparición.
Invasión de Animales Domésticos (INVD)	La invasión de animales domésticos, principalmente de ganado bovino, trae consigo numerosos efectos, tanto en la biología del humedal (p.e. transportando hacia el humedal especies invasoras como los pastos) como los aspectos hidrológicos y de suelos (pisoteo, compactación y destrucción de la estructura del suelo).

4.3 SELECCIÓN DE PUNTOS

La selección de puntos tuvo como objetivo hacer una depuración de la tabla de datos, en la cual se eliminaron los puntos redundantes, es decir, aquellos puntos adicionales correspondientes a un mismo humedal, que además tenían puntajes exactos al del punto principal. Es decir, se efectuó la depuración de la tabla para que cada humedal contara con un solo punto, el cual tiene asignado un puntaje que representa la totalidad del humedal.

4.4 EXPLORACIÓN DE DATOS

El Análisis Exploratorio de Datos (EDA) es una colección de técnicas para resumir las propiedades de los datos mediante estadística descriptiva, pero también permite determinar la presencia de patrones en los datos, identificar elementos interesantes o inusuales en los datos, detectar errores, diferenciar los elementos importantes de aquellos accidentales, y formular hipótesis sobre los datos. (Haining, 2004). Para la exploración de datos se utilizaron los principales estadísticos descriptivos, utilizando el software IBM SPSS 19².

Los estadísticos descriptivos utilizados fueron los siguientes: media, mediana, varianza, desviación estándar, máximo, mínimo, rango, amplitud intercuantil, asimetría y curtosis.

² IBM Corp. Released 2010. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 19.0. Armonk, NY: IBM Corp.

Se hicieron pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov³ y de Shapiro-Wilk⁴, con el fin de determinar el ajuste a la distribución normal del conjunto de datos. En el apartado gráfico, se generaron un histograma con la distribución de frecuencia, un gráfico cuantil – cuantil normalizado (Normalized Q-Q Plot), y un gráfico de caja, para establecer visualmente el ajuste a la normalidad.

Con esta primera mirada a los datos se obtiene un mejor conocimiento acerca de su distribución, lo que nos permite conocer las limitaciones de la información de cara principalmente a procesos geoestadísticos formales como el Kriging en cualquiera de sus formas.

4.5 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ESPACIALES

El ESDA (Análisis Exploratorio de Datos Espaciales, por su signa en Inglés), comprende además técnicas para la exploración de datos espaciales, como su nombre lo indica. Sirve para resumir las propiedades de los datos espaciales, para detectar patrones en los datos, formular hipótesis con referencia a la geografía de los datos, o identificar casos o subconjuntos de casos que son inusuales dada su ubicación en el mapa (Cressie, 1984; Haining, 2004). Para la presente investigación se realizaron los análisis exploratorios de datos espaciales de uso más común, que pueden encontrarse en la aplicación ArcGis 10.1⁵.

4.5.1 Polígonos de Voronoi

Los mapas de Voronoi se construyen a partir de una serie de polígonos formados alrededor de la ubicación de un punto muestral. Los polígonos de Voronoi son creados de manera

³ Massey, F.J. 1951. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 46, No. 253. (1951), pp. 68-78.

⁴ SHAPIRO, S.S., WILK, M.B., and H.J. CHEN. 1968. A Comparative Study of Various Tests for Normality *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, No. 324. (1968), pp. 1343-1372

⁵ ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

que cada localización dentro del polígono sea más cercana al punto muestral correspondiente. La vecindad entre puntos se define por el hecho de compartir un lado con el respectivo polígono. Los puntos cuyos polígonos comparten puntos se consideran vecinos.

Esta definición de vecindad permite calcular diferentes estadísticos. Por ejemplo, existe la posibilidad de calcular para cada polígono, el promedio de los valores de él y sus vecinos, pudiendo visualizar en el mapa regiones con valores altos y bajos. Estos estadísticos incluyen la media, la moda, la agrupación o *cluster* (que identifica valores sustancialmente diferentes de sus vecinos), entropía (que mide la variabilidad entre vecinos), mediana, desviación estándar y rango intercuantil (Johnston et al., 2003).

4.5.2 Índice Moran's I

El índice Moran's I^6 mide la autocorrelación espacial. La autocorrelación espacial es la relación que presentan los valores de una misma variable entre diferentes puntos de un arreglo espacial, dado un conjunto de elementos espaciales y un atributo asociado. La autocorrelación espacial se considera de carácter complejo, dado que la correlación espacial es multidimensional. El estadístico Moran's I se calcula de la siguiente forma:

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}$$

Donde N es el número de unidades espaciales indexadas por i y j ; X es la variable de interés, \bar{X} es la media de la variable de interés, y w_{ij} es un elemento de la matriz de pesos espaciales.

⁶ MORAN, P. A. P. 1950. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika* 37 (1): 17–23.

Los valores negativos indican una autocorrelación espacial negativa y los valores positivos indican que la autocorrelación espacial es positiva. Los valores van desde -1, que significa una dispersión perfecta, hasta 1, que indica correlación perfecta. Un valor de cero indica un patrón espacial aleatorio. Para la prueba de hipótesis estadísticas, los valores del Moran's I pueden ser transformados a Z-scores, en los cuales los valores mayores a 1,96 o menores a -1,96 indican una autocorrelación espacial que es significativa al nivel del 5%. (Li et al., 2007; Moran, 1950).

El análisis de datos espaciales nos permite responder preguntas sobre la ubicación en el mapa de casos extremos en el histograma, o sobre la ubicación de un punto del mapa en el gráfico de dispersión, o si existen patrones en la distribución de determinado subconjunto de datos. En resumen, el ESDA faculta al investigador para efectuar consultas precisas e hipótesis sobre sus datos.

4.5.3 Índice Getis-Ord G General

El índice Getis-Ord G General mide el grado de agrupamiento tanto para valores altos como para valores bajos, utilizando el estadístico Getis-Ord G General. (Haining, 2004). Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j}(d) x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}, \forall j \neq i;$$

Donde d es la distancia de vecindad, $w_{i,j}$ los pesos de la matriz y x_i y x_j son los atributos de la localización i y la localización j , respectivamente.

El z.score y el p-value son medidas de significancia estadística, que dicen si se rechaza o no la hipótesis nula. La hipótesis nula dice que los valores asociados con las entidades espaciales están distribuidas de manera aleatoria.

Mientras más altos o bajos sean los valores del z-score, más fuerte es la intensidad del agrupamiento. Un z-score cercano a cero indica que no existe un agrupamiento aparente dentro del área de estudio. Un z-score positivo indica el agrupamiento de valores altos, y uno negativo el agrupamiento de valores bajos.

4.5.4 Análisis de Vecino más Próximo (*Nearest Neighbor Analysis*)

Este análisis se fundamenta en la comparación del promedio de las distancias empíricas entre cada punto y su vecino más próximo, y el promedio de distancias teóricas de una función aleatoria. Los valores cercanos a cero (0) expresan un patrón totalmente concentrado, a medida que se aproximan a uno (1), el análisis expresa una distribución aleatoria de los puntos, y cerca de dos (2), la distribución de los puntos en el espacio es totalmente uniforme.

4.6 INTERPOLACIÓN DE DATOS

La interpolación de datos es el objetivo central de la estadística espacial. La posibilidad matemática y estadística de aproximarse o conocer los valores que puede adquirir una variable en sitios no muestreados ha sido una de las tareas primordiales en este campo. El medio para lograrlo es la interpolación. A continuación se revisan los dos tipos de interpolación, así como sus más importantes métodos. Ambos tipos de interpolación son diferentes entre sí, toda vez que los métodos determinísticos interpolan con base en la distancia entre vecinos, asignando ponderaciones, mientras que los modelos probabilísticos tienen en cuenta la presencia de autocorrelaciones entre puntos. Por otro lado, los métodos determinísticos utilizan únicamente modelos matemáticos, mientras que los probabilísticos emplean modelos estadísticos que permiten conocer el nivel de certidumbre de los datos interpolados, y la estimación de superficies de error (Koch and Cabrera 2010).

4.6.1 Interpolación determinística

Los modelos de predicción determinística (o mecánica, como la llama Hengl, 2009) son la aproximación más primitiva a la interpolación espacial. Su uso es sencillo y flexible, aunque puede considerarse como subjetiva o empírica, pues el ajuste de los parámetros se hace con frecuencia basado en una evaluación visual de los resultados, y usualmente se emplea aceptando los parámetros propuestos por los diferentes paquetes de software que existen en el mercado. La interpolación determinista incluye técnicas como los polígonos de Thiessen, la interpolación inversa a la distancia (IDW), la regresión con coordenadas y diferentes tipos de *splines*. (Hengl, 2009).

4.6.1.1 Interpolación inversa a la distancia (IDW)

Esta técnica se fundamenta en la asignación de pesos a los valores que adquiere una variable en los diferentes puntos del espacio, siendo mayores los pesos cuando menor es la distancia a los puntos muestreados.

Para efectuar los cálculos debe fijarse la distancia, el número de vecinos a tener en cuenta, y la potencia, es decir, la fuerza con la que disminuye la ponderación a medida que aumenta la distancia.

El valor de los puntos se calcula con la siguiente fórmula:

$$V_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} v_{Q_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Donde n es el número de puntos en el radio de búsqueda, d_i^p es la distancia entre pares de puntos, y v_{Q_i} es el punto muestreado dentro del radio de búsqueda.

Los datos resultantes pueden ser evaluados mediante validación cruzada, técnica que consiste en la remoción de cada punto y su estimación según el modelo, para posteriormente comparar los valores medidos con los valores estimados (Johnston et al., 2003).

4.6.2 Interpolación probabilística

Como ya se ha dicho, los modelos estadísticos de predicción espacial se apoyan en el uso de una serie de coeficientes, con el fin de derivar salidas que permitan hacer estimaciones objetivas, con base en las leyes de la probabilidad. Los modelos probabilísticos permiten entre otras cosas: producir mapas más confiables y objetivos, mapas óptimos; comprender las fuentes de error en los mapas; y señalar áreas problemáticas que deben ser revisadas (Hengl, 2009).

La técnica más importante en interpolación probabilística es el Kriging, que tiene múltiples variaciones, todas ellas de amplia aplicación en las ciencias ambientales (Hartkamp et al., 1999; Li and Heap, 2011, 2008).

A diferencia de los métodos deterministas, los modelos geoestadísticos requieren de una serie de pasos previos para llegar a un adecuado conocimiento de la información, que permita tomar decisiones acertadas al momento de llevar a cabo la interpolación.

4.6.2.1 Ajuste a un modelo teórico de semivarianza

El primer paso realizado para la generación de superficies por medio de funciones geoestadísticas es la generación de un semivariograma o variografía. El problema de predicción espacial del kriging requiere del conocimiento de la estructura de autocorrelación para cualquier posible distancia entre sitios dentro del área de estudio. El objetivo es lograr que mediante un modelo se generalice lo observado a cualquier

distancia, para de esta forma efectuar el cálculo de los puntos no monitoreados. (Giraldo H., 2003).

El variograma representa la tasa media de cambio de una variable determinada, a medida que se modifica la distancia. La dependencia espacial disminuye a medida que aumenta la distancia, h , y finaliza a una cierta distancia, el rango. Más allá del rango, la tasa media de cambio es independiente de la separación entre las observaciones. (Moral García, 2004).

4.6.2.2 Análisis de tendencia y selección del método

Se utiliza el análisis de tendencia para identificar si, además de la variación aleatoria, y además de las variaciones intrínsecas de la variable, existen variaciones asociadas con la posición geográfica, que agregan ruido al proceso de interpolación probabilística. Una forma usual de evaluar la presencia de tendencias es graficar los valores de los puntos con respecto a las coordenadas en los diferentes ejes. Una vez determinado si existe o no tendencia, y el tipo de la misma, se procede a elegir el tipo de Kriging que se va a utilizar. Se recomienda el uso de Kriging Universal en aquellos casos en que existe tendencia en los datos.

5 RESULTADOS

5.1 AJUSTE DE DATOS Y SELECCIÓN DE PUNTOS

De un total de un total de 347 puntos levantados en el estudio realizado por Aguas y Aguas de Pereira (Restrepo et al., 2005), fueron seleccionados 195 correspondientes al área de estudio. Para estos humedales se supone que existe una relación más fuerte en términos espaciales, dado que, como ya se ha dicho con referencia al área de estudio, ésta representa una superficie homogénea. La homogeneidad de la superficie se basa en fundamentos físicos (geología, clima, características del terreno, origen de suelos), como geográficos, es decir, aquellos que hacen referencia a la ocupación de un territorio por parte de un conglomerado humano con características culturales definidas. Lo anterior nos da como resultado una superficie con coherencia en términos ambientales.

Los puntos obtenidos fueron filtrados nuevamente, eliminando los puntos suplementarios levantados para los distintos humedales, dejando a cada humedal con un punto que lo representa. Esto evita que existan valores sobrerrepresentados en el conjunto de datos, lo que agrega más ruido que información al proceso de análisis. Al final se obtuvieron 117 puntos. En la Figura 4 se muestra el mapa que presenta los puntos seleccionados a partir de aquellos obtenidos inicialmente. La Figura 5 muestra los humedales seleccionados simbolizados según su calificación total ponderada de acuerdo a lo expresado en la metodología.

Como primer insumo para observar la variación de los impactos en el espacio, el mapa de la Figura 5 nos muestra una concentración de registros principalmente en las veredas El Bosque y Cortaderal. En esas zonas se encuentran condiciones de pendiente e hidrológicas que confluyen

para que allí se presente un mayor número de humedales, así como humedales áreas considerables, en relación con muchos de los que se presentan en otros lugares de la zona de estudio. No obstante, en zonas relativamente alejadas de estos sitios, como El Agrado y las zonas de El Mosquito y Torrecitas, se encuentran humedales que presentan impactos de moderados a altos.

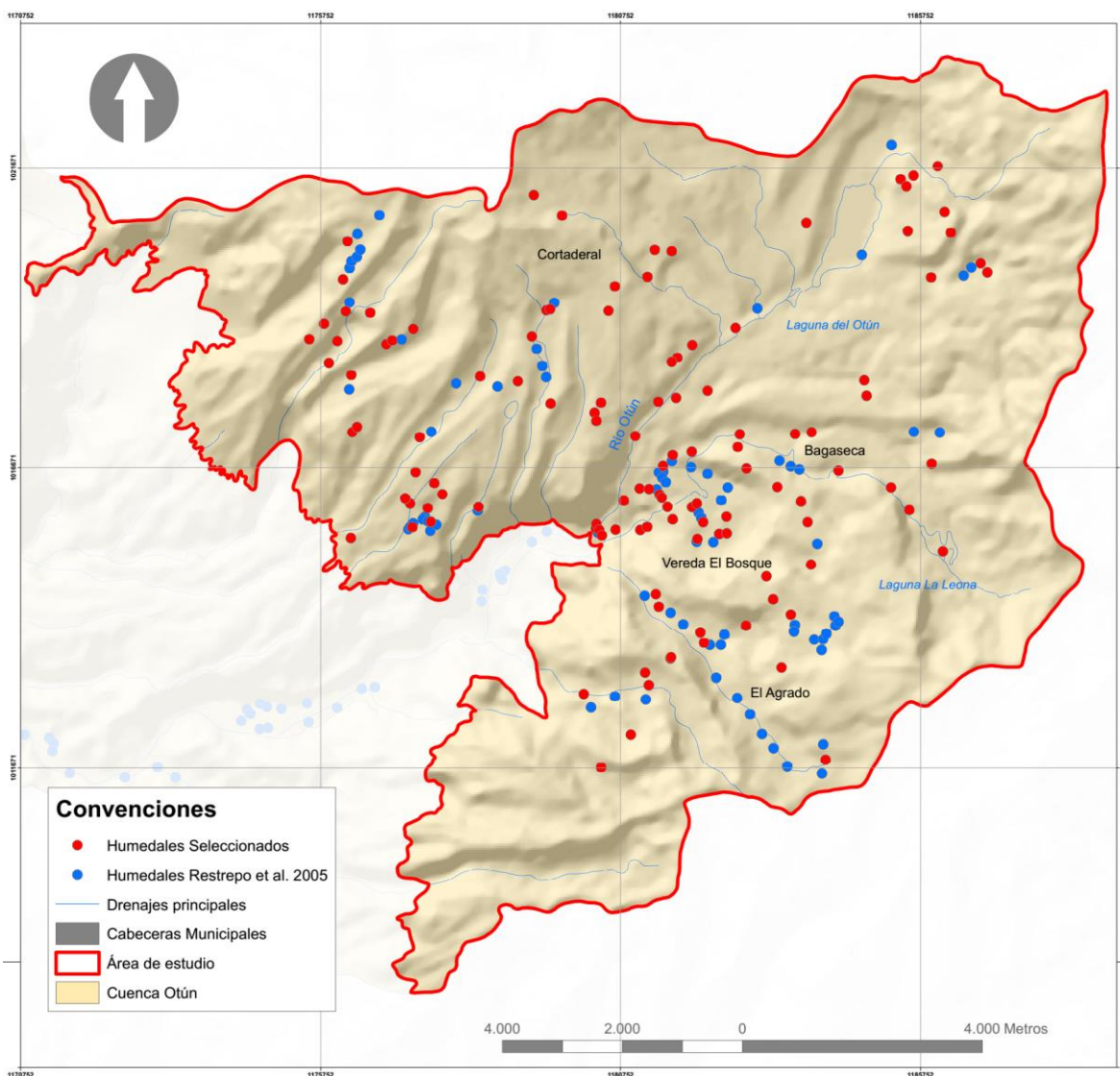


Figura 4. Puntos levantados en humedales seleccionados para la realización de análisis espaciales en la cuenca alta de río Otún.

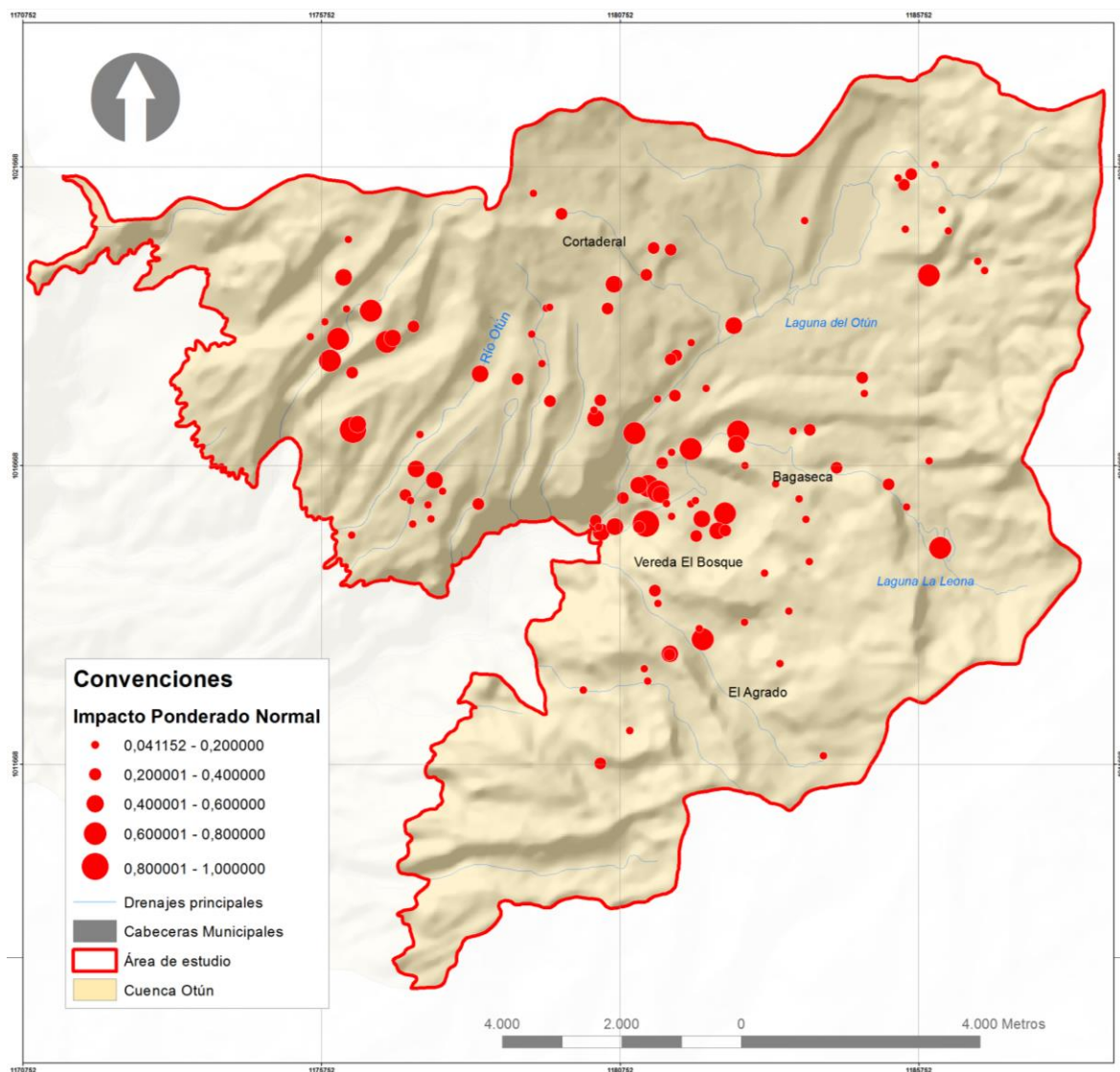


Figura 5. Humedales de la cuenca alta del río Otún simbolizados según la magnitud de los impactos registrados.

5.2 EXPLORACIÓN DE DATOS

5.2.1 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS

Para el análisis de datos se tuvo un tamaño muestral de 117 puntos levantados en humedales, cada uno de los cuales representa a un solo humedal. Según el reporte del programa estadístico, no se tuvo ningún dato perdido.

En primer término, se obtuvo un Rango de 0,904, es decir, una variación del 90%, tomando en cuenta que el resultado ha sido normalizado y se expresa en porcentajes. El resultado nos muestra un amplio rango de variación en el estado de los humedales, asociado a la magnitud de los impactos que los mismos reciben. En la misma área de estudio tenemos un puntaje ponderado normalizado máximo de 0,946 y un mínimo de 0,0411, Esto quiere decir que se encuentran en la cuenca alta del Otún tanto humedales que reciben muy pocos impactos, y se encuentran en un estado casi prístino, como humedales que reciben la puntuación máxima en la mayor parte de los impactos evaluados durante el estudio.

En promedio, la magnitud de los impactos recibidos por los humedales del área de estudio es de 0,2890, un valor moderadamente bajo, pero que debe mirarse con atención para la gestión del área, dada la alta vulnerabilidad ecosistémica que se tiene para los ecosistemas de páramo. En este caso es adecuado revisar el dato de la media a la par con la mediana. Una mediana de 0,22 nos indica que la mitad de los casos se encuentra por debajo de esta calificación, de lo que se infiere que por lo menos el 50% de los casos registrados presenta unas condiciones aceptables, recibiendo impactos relativamente bajos.

En cuanto a la dispersión de los datos alrededor de la media, encontramos una desviación típica o desviación estándar de 0,216, lo que indica una alta dispersión de los datos. La Tabla 6 presenta el resumen de los estadísticos descriptivos generado por el programa estadístico.

En resumen, se puede decir que el estado de los humedales, según los estadísticos descriptivos, es moderadamente bueno, toda vez que la mediana y la media nos muestran una incidencia de impactos sobre los humedales relativamente baja, sin embargo, existe una alta probabilidad de encontrar fuertes desviaciones alrededor de la media, en un rango

que puede llevarnos desde la presencia de humedales prácticamente prístinos, hasta humedales en muy malas condiciones, cercanos a la desaparición.

Tabla 6. Resumen de los estadísticos descriptivos.

		Estadístico	Error típ.
POND_NORMAL	Media	0,28906593	0,020033214
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	
		0,24938762 0,32874423	
	Media recortada al 5%	0,27249025	
	Mediana	0,22263375	
	Varianza	0,047	
	Desv. típ.	0,216692338	
	Mínimo	0,041152	
	Máximo	0,946091	
	Rango	0,904938	
	Amplitud intercuantil	00,283333	
	Asimetría	1,161	0,224
	Curtosis	0,548	0,444

Notas: Estadístico es la columna que contiene los valores para cada uno de los estadísticos, Error típ se refiere a la desviación estándar para los diferentes estadísticos

Con el fin de tener una apreciación clara de la distribución de los datos según su frecuencia, se generó un histograma, que puede observarse en la Figura 6.

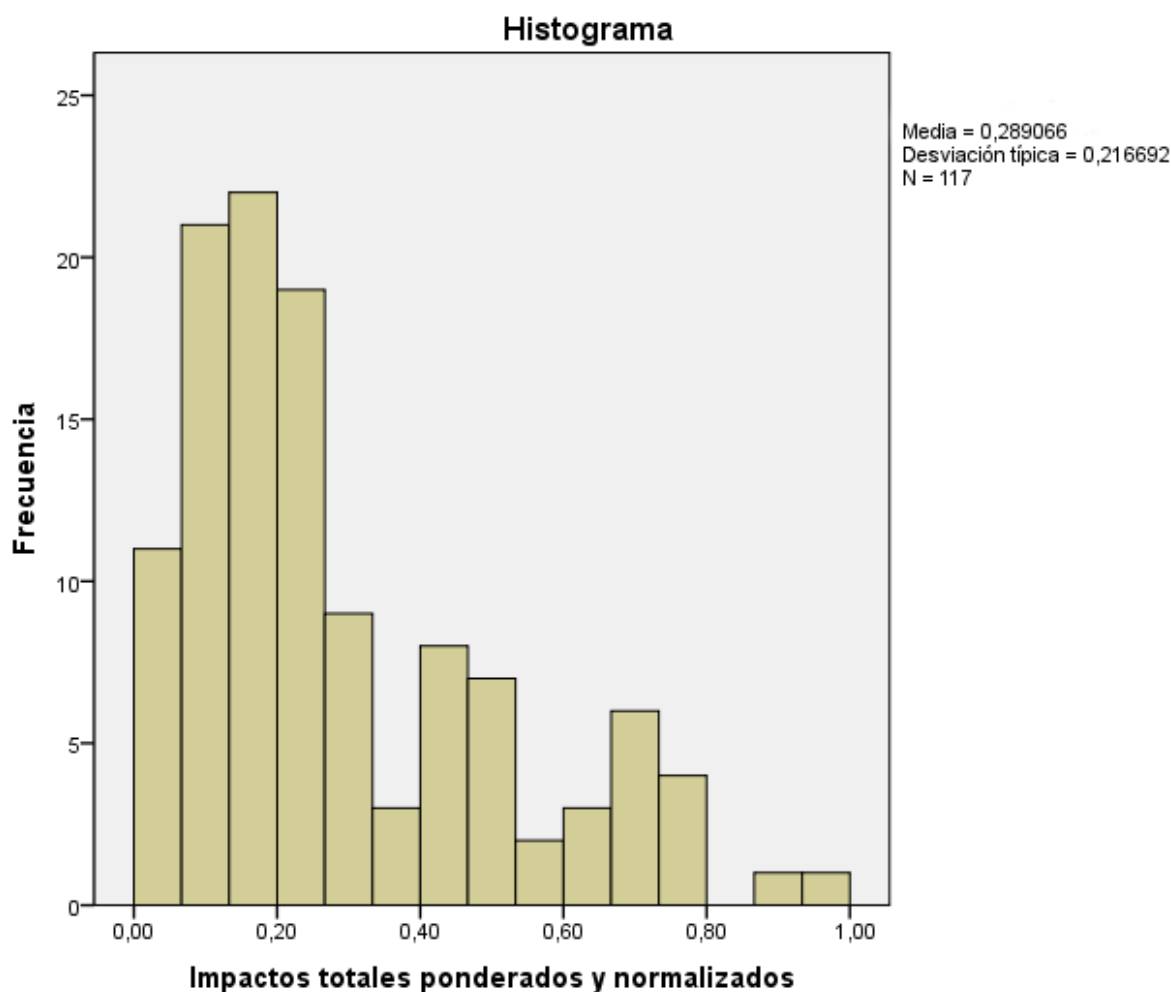


Figura 6. Histograma de frecuencias para los datos de impactos totales ponderados y normalizados. Los impactos totales ponderados y normalizados resultan de la ponderación y normalización de los valores cualitativos para la suma los impactos individuales.

Se observa en el histograma que los datos parecen ajustarse a una distribución log-normal. Esto es confirmado por los datos de asimetría (1,161), que nos muestran un sesgo hacia la derecha. Debe tomarse en cuenta que el programa estadístico utilizado trabaja con valores alrededor del 0 para este dato. La curtosis, por otro lado, nos muestra una distribución con un elevado número de casos agrupado alrededor de la media.

5.2.2 PRUEBAS DE NORMALIDAD

Revisando el histograma, es evidente que los datos no se ajustan a una distribución normal, sino a una distribución log-normal, como ya se ha dicho. Esta observación puede

corroborarse con la generación de un gráfico cuantil-cuantil normalizado (normalized q-q plot), que nos muestra la desviación de los puntos con respecto a la distribución normal. El gráfico puede observarse en la Figura 7. El gráfico de cajas y bigotes (Figura 7) nos confirma igualmente lo observado.

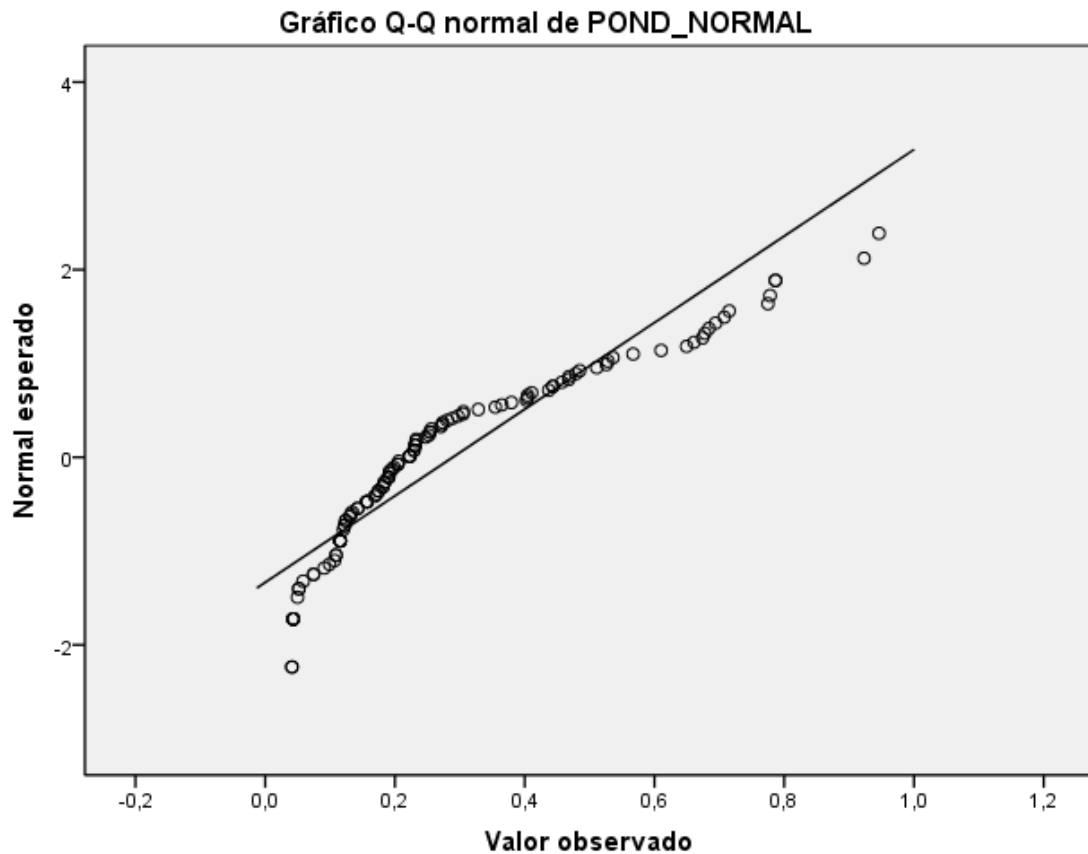


Figura 7. Gráfico cuantil - cuantil Normalizado (Normalized QQ Plot).

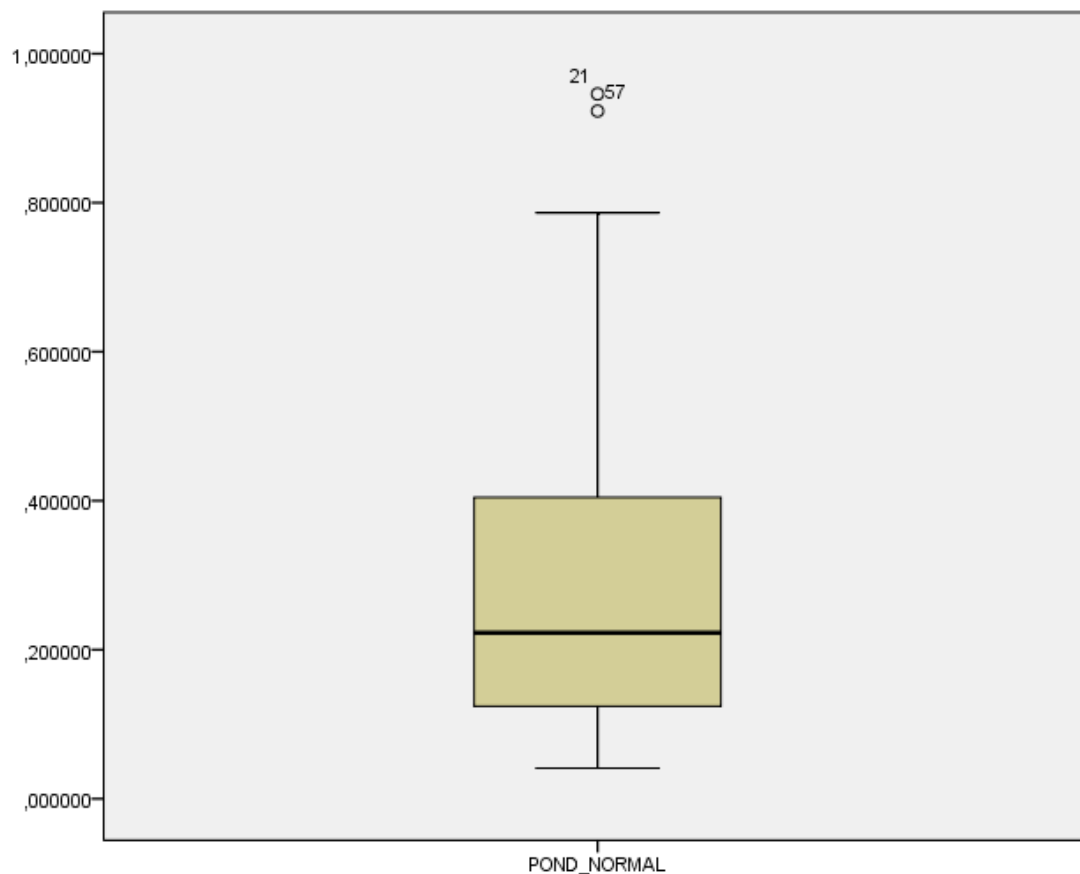


Figura 8. Gráfico de cajas y bigotes. Este gráfico muestra la tendencia que tiene la gráfica hacia arriba de la media. Concuerda con un histograma que tiene una cola larga hacia la derecha y mayor cantidad de datos agrupados hacia la derecha.

Se realizaron pruebas de normalidad para verificar numéricamente lo observado en las gráficas, encontrando que para ninguna de las dos pruebas realizadas (Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk) evidenció normalidad en los datos.

Dado que los datos presentaron un sesgo a la derecha, se efectuó una exploración en cuanto a la posibilidad de normalizar los datos con una transformación logarítmica, obteniendo datos con una distribución cercana a la normal, según la Tabla 7, donde la significancia estadística para confirmar la normalidad de los datos se alcanza en la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y apenas se aproxima en Shapiro-Wilk.

Tabla 7. Pruebas de normalidad para datos después de transformación logarítmica.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
LOG	0,058	117	0,200*	0,970	117	0,009

Nota: la significancia estadística para confirmar la normalidad de los datos se alcanza en la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y apenas se aproxima en Shapiro-Wilk.

Las gráficas que se presentan a en las figuras Figura 9, Figura 10 y Figura 11 permiten confirmar la aproximación de los datos a la normalidad. Esta información es importante para procesos posteriores, en los cuales es requerida o recomendada la normalidad de los datos. Un ejemplo de ello es la generación de superficies de error para modelar la incertidumbre correspondiente al kriging, o la posibilidad que nos da el kriging de transformar los datos para un mejor resultado.

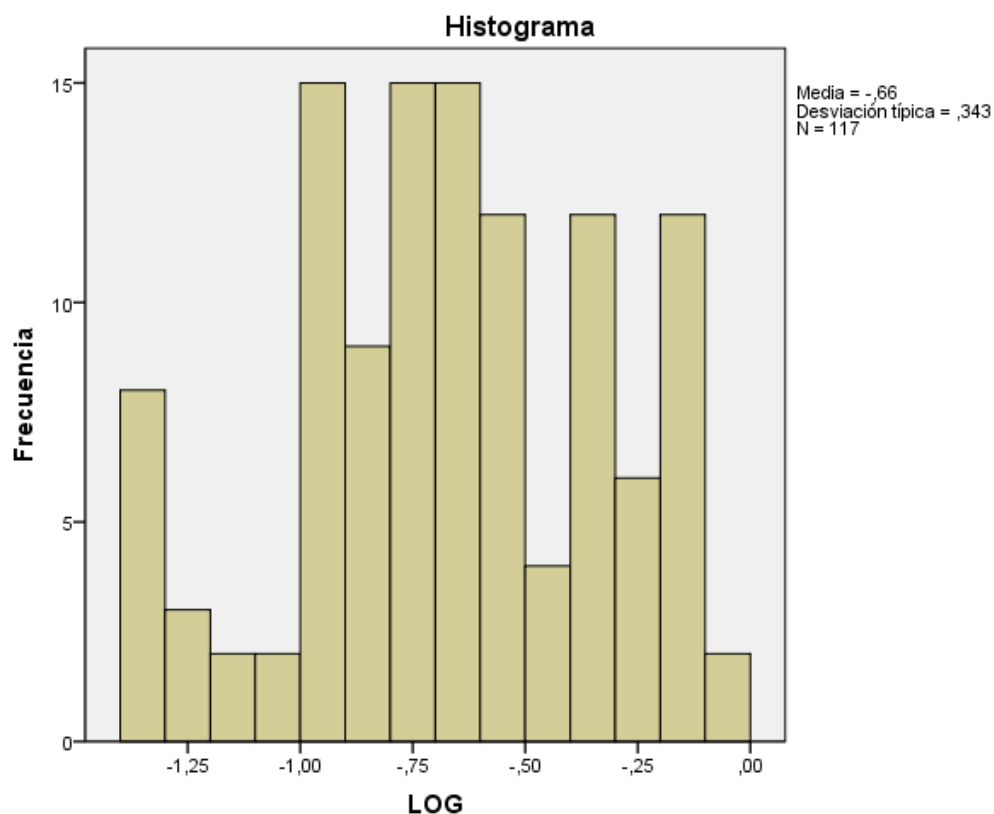


Figura 9. Histograma de los datos después de una transformación logarítmica.

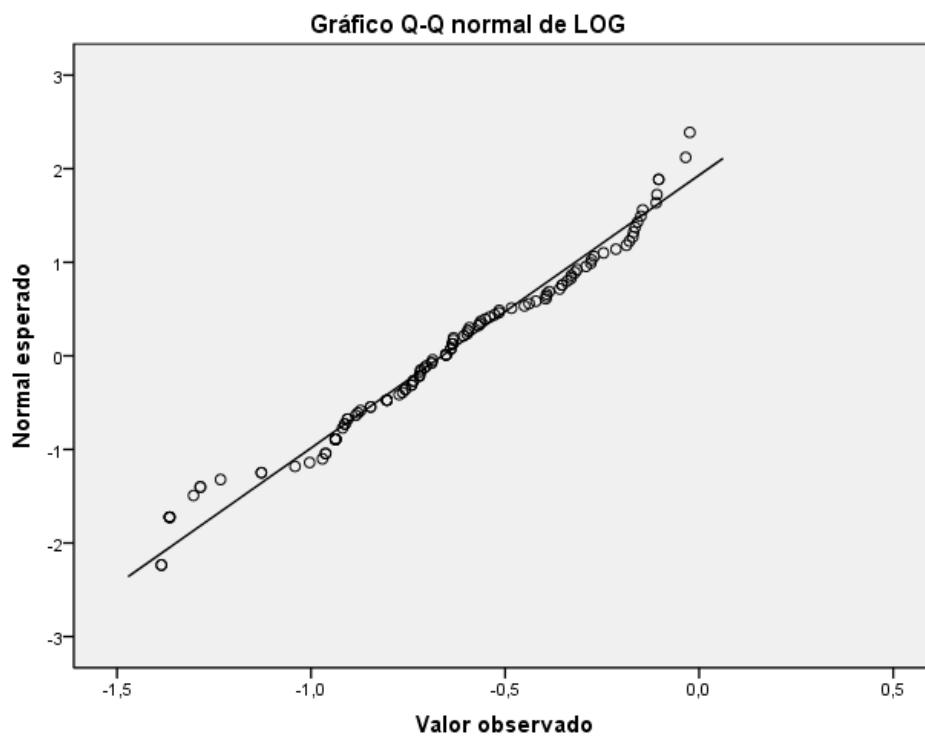


Figura 10. Gráfico Q-Q Normalizado para los datos después de transformación logarítmica.

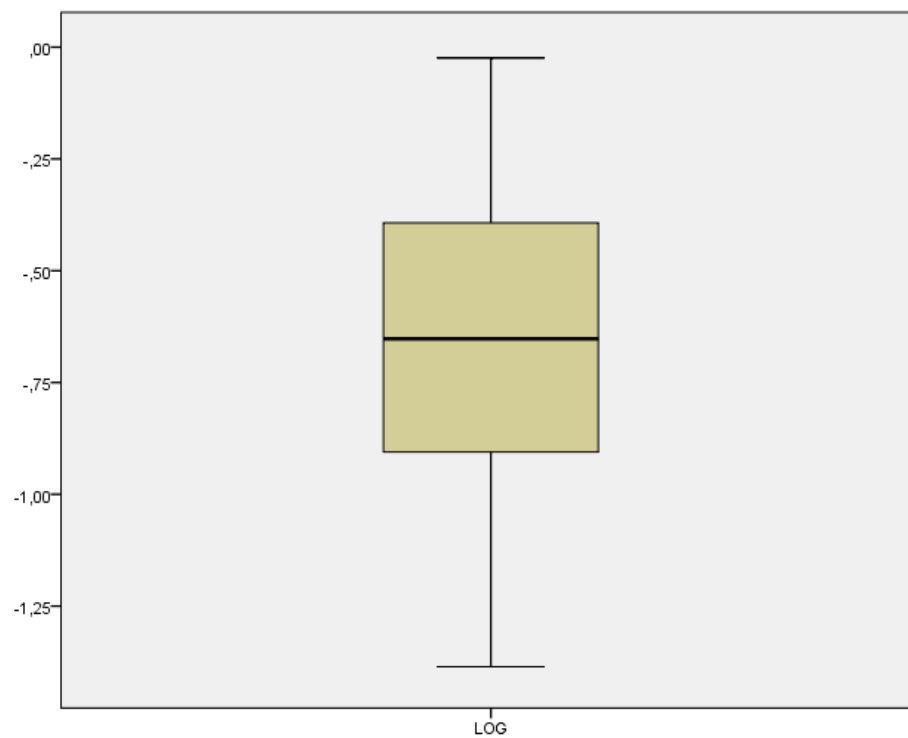


Figura 11. Gráfico de cajas y bigotes para los datos después de una transformación logarítmica

5.3 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ESPACIALES (ESDA)

El paso lógico después de la exploración de los datos es el de conferirle un carácter espacial, es decir, si el EDA nos fue de utilidad para establecer cuáles eran los datos o casos con valores más altos o bajos, o cuál era la medida de tendencia central, el ESDA nos permite agregar la dimensión espacial a este reconocimiento previo de los datos. Preguntas como ¿dónde se encuentran los datos inusualmente altos o bajos?, pueden ayudar a comprender los datos, a conocer si los mismos presentan problemas desde su levantamiento, y deben ser removidos, o si sus valores corresponden efectivamente a la naturaleza de la información.

5.3.1 GRÁFICO CUANTIL-CUANTIL CON CAPACIDADES ESPACIALES

En el caso particular de los humedales en la cuenca alta del río Otún, se utilizó una primera herramienta para iniciar con estas preguntas. Esta herramienta fue el Q-Q Plot del ArcGIS 10.1, que nos permite seleccionar los puntos con valores anómalos para revisar su ubicación (Figura 12). La exploración permitió revisar los datos actuales para verificar su integridad, haciendo notar que no existen problemas en cuanto a imprecisiones durante el levantamiento, y que lo referido en la tabla de atributos coincide con lo observado en campo. Los datos con valores más elevados se encuentran en sitios que actualmente se encuentran ocupados por familias que hacen uso de esos terrenos, razón por la cual los impactos tienden a aumentar. Los datos, por lo tanto no pueden ser eliminados, y debe asumirse esta fuente de ruido para futuros análisis. Un fenómeno que puede estar presentándose es el de la influencia del área de los humedales. En ocasiones un humedal con mayor área puede recibir un mayor número de impactos, por ejemplo la ganadería, mientras que cerca al mismo podemos encontrar humedales con pocos impactos, debido a que el área no es representativa para alojar el ganado o para establecer cultivos.

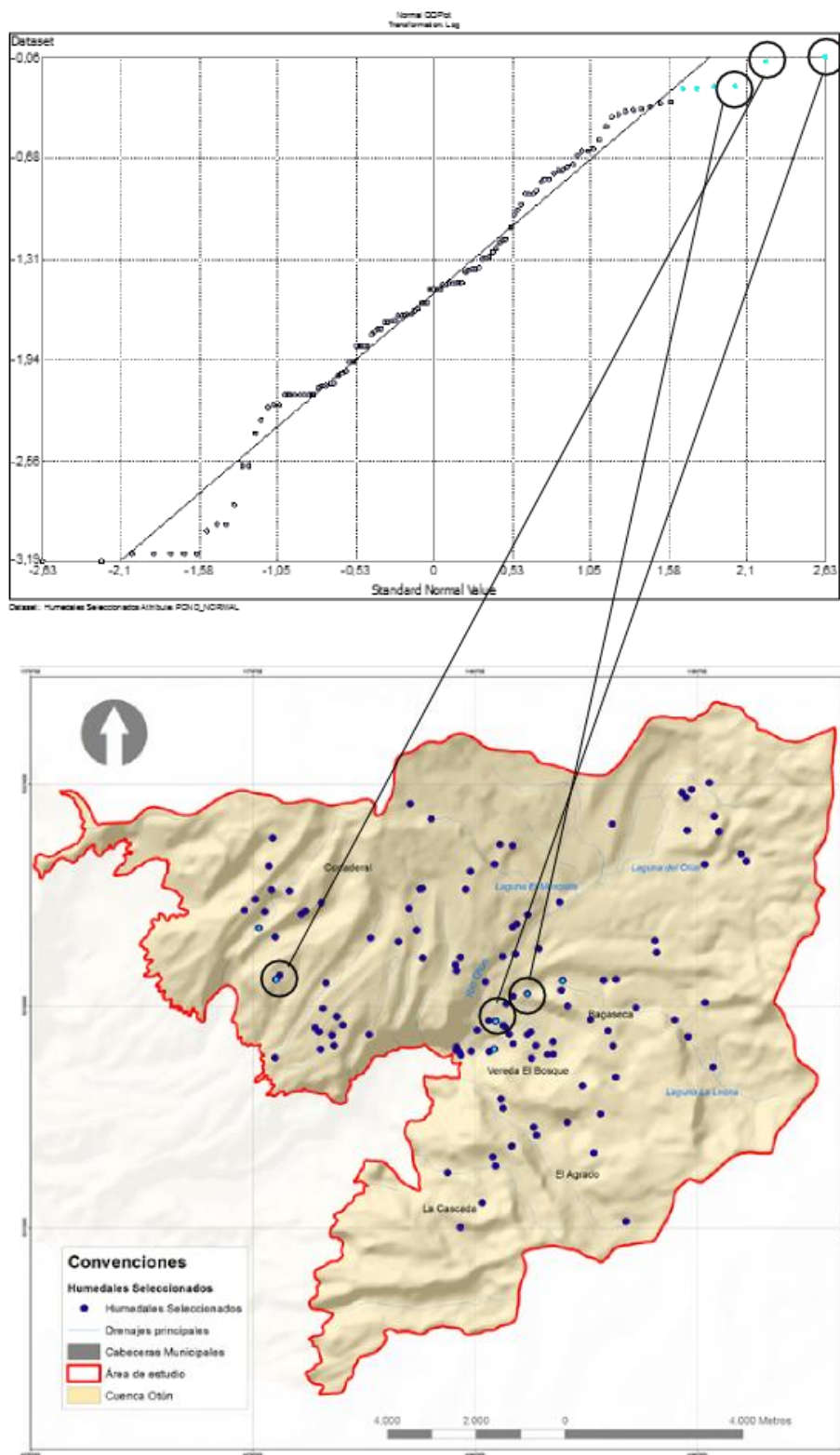


Figura 12. Q-Q Plot Normalizado de ArcGIS 10.1 donde se encuentran seleccionados los subrepresentados, con valores anómalamente altos y su correspondencia en el mapa.

5.3.2 POLÍGONOS DE VORONOI

Los polígonos de Voronoi son una técnica que permite acercarnos al proceso de interpolación para tener un mejor conocimiento de los datos, y permiten empezar a descubrir la presencia de estructuras en los mismos.

Se generaron para el área de estudio, polígonos de Voronoi con base en la variable Total de Impactos Ponderados Normalizada.

Lo primero que puede apreciarse es que los polígonos son de tamaños irregulares, lo que indica que existen zonas que, o bien se encuentran submuestreadas, o bien, estas zonas presentan condiciones en las que la formación de humedales es más común. Estas condiciones pueden ser de pendiente e historia geológica, normalmente vinculada con la dinámica del hielo. Es de esta forma que zonas como El Bosque y Cortaderal, principalmente tienen un mayor número de puntos.

Con respecto al comportamiento de la variable de estudio, es evidente que existe mucha entropía en los datos, lo que se hace notorio al no detectar tendencias claras de agrupamiento en torno a algunos valores. Se evidencia lo anterior, al observar el mapa de *clusters*, (Figura 13) en el cual se indican en color gris aquellos polígonos que no comparten valores con ninguno de sus vecinos. Estos datos pueden ser calificados como *statistical outliers*, o datos anómalos. De otro lado, el mapa basado en la media (Figura 14), nos presenta un panorama ligeramente homogenizado, que deja ver la presencia de estructuras de agrupación en torno a las áreas con mayor población, como son Cortaderal y El Bosque, con una disminución paulatina en la magnitud de los impactos a medida que se aumenta la distancia.

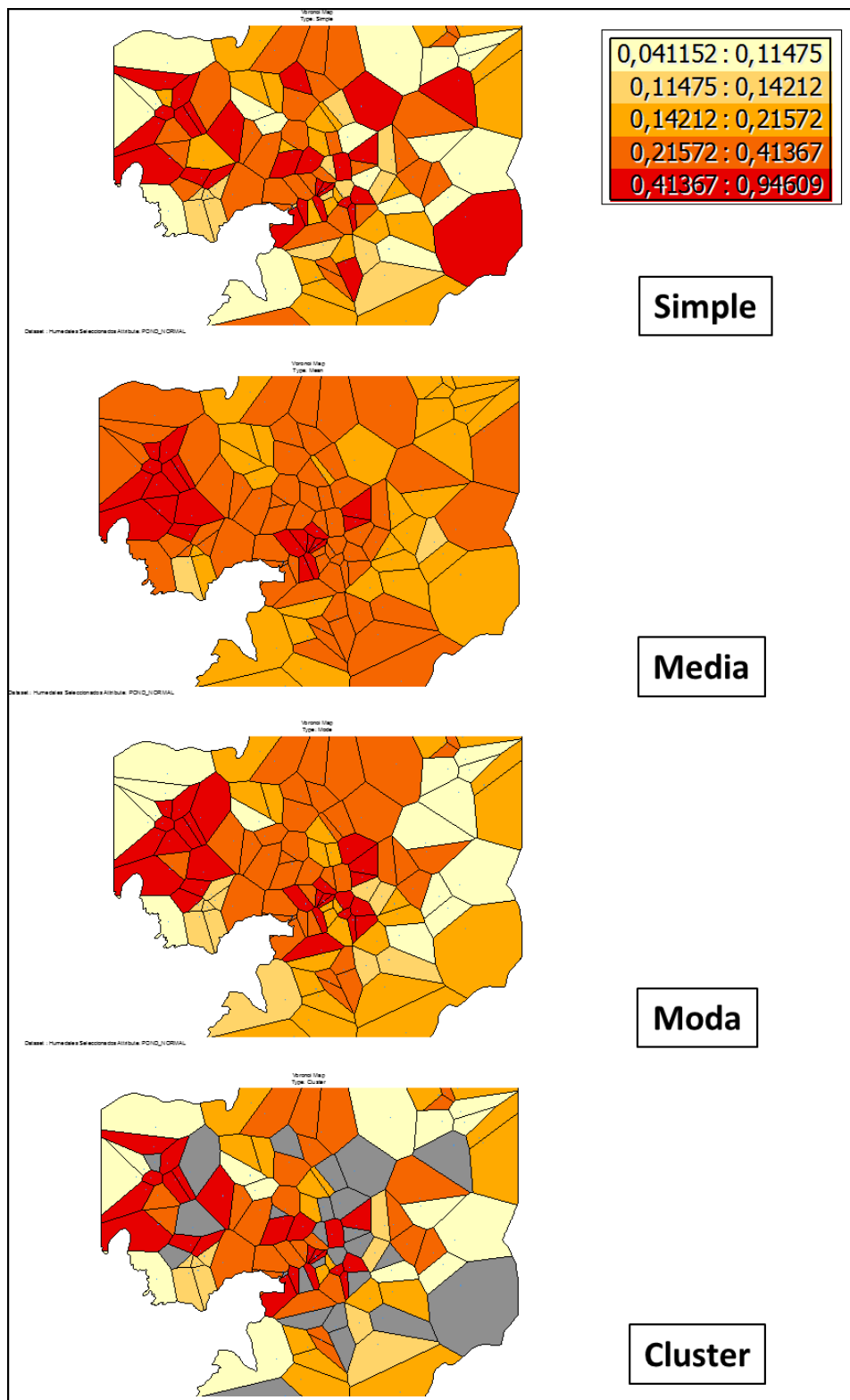


Figura 13. Polígonos de Voronoi calculados para el área de estudio de acuerdo a diferentes estadísticos (Valor, Media, Moda y Cluster). Aunque representando datos simples no se observan tendencias, es posible apreciar agrupaciones representando la media y la moda.

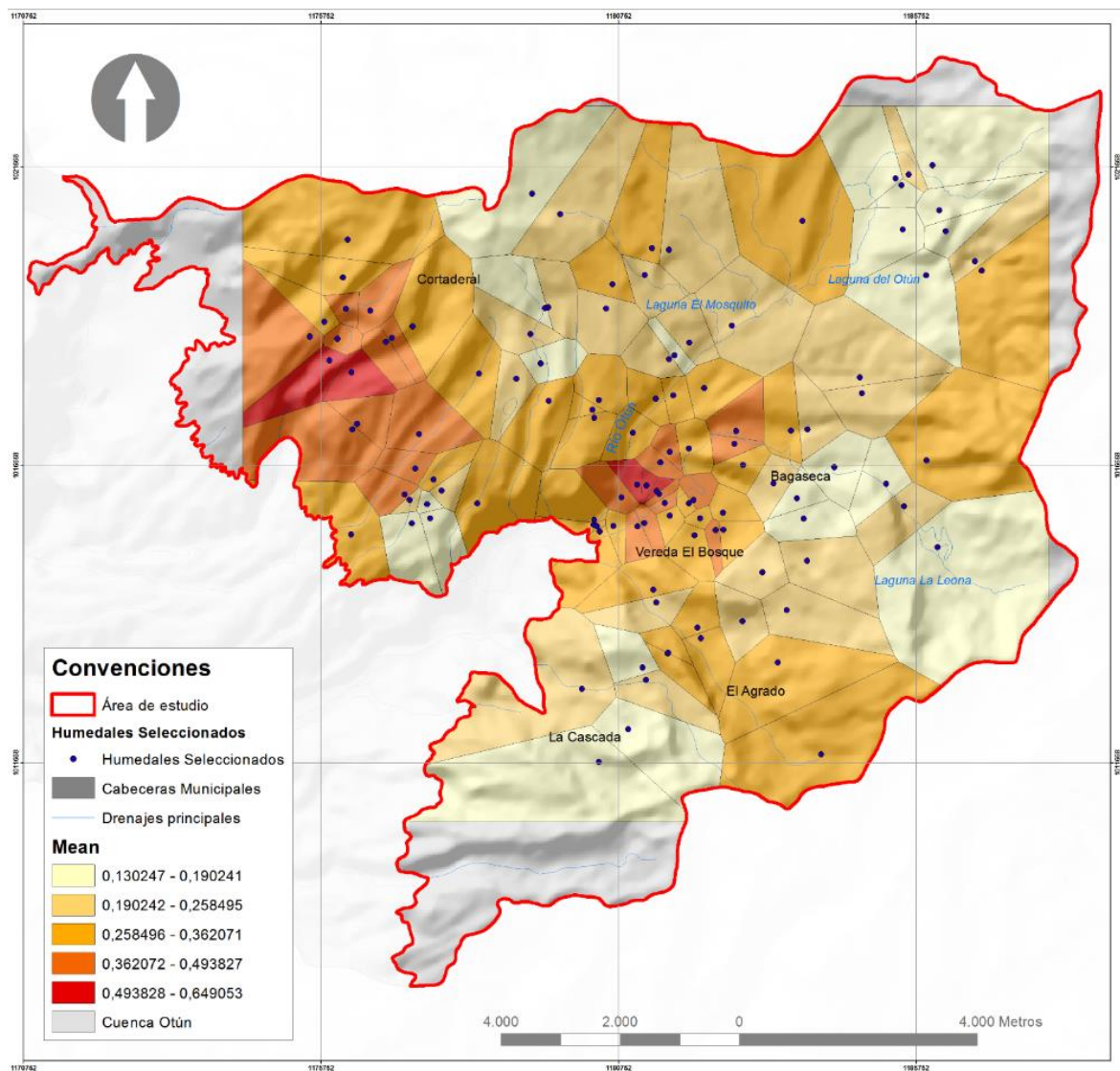


Figura 14. Mapa de polígonos de Voronoi. Los polígonos se simbolizan según el valor promedio de cada polígono y sus vecinos.

5.3.3 PATRONES DE DATOS – ÍNDICE MORAN'S I

Una parte importante de la exploración de datos espaciales es la detección de estructuras de datos, mediante la aplicación de índices que nos permitan hacernos una idea de la autocorrelación espacial en los datos. Se calculó el Índice Moran's I, con la finalidad de detectar la forma en que se relacionan los valores de la variable entre diferentes puntos del arreglo espacial. El resultado del índice Moran's I, indica que sí existen estructuras en los datos, en cuanto a su ubicación y contenido, dado que la hipótesis de autocorrelación se

confirma de manera estadísticamente significativa (Ver Figura 15). Este fenómeno que, en apariencia, según las aproximaciones iniciales a los datos, no era fácilmente observable.

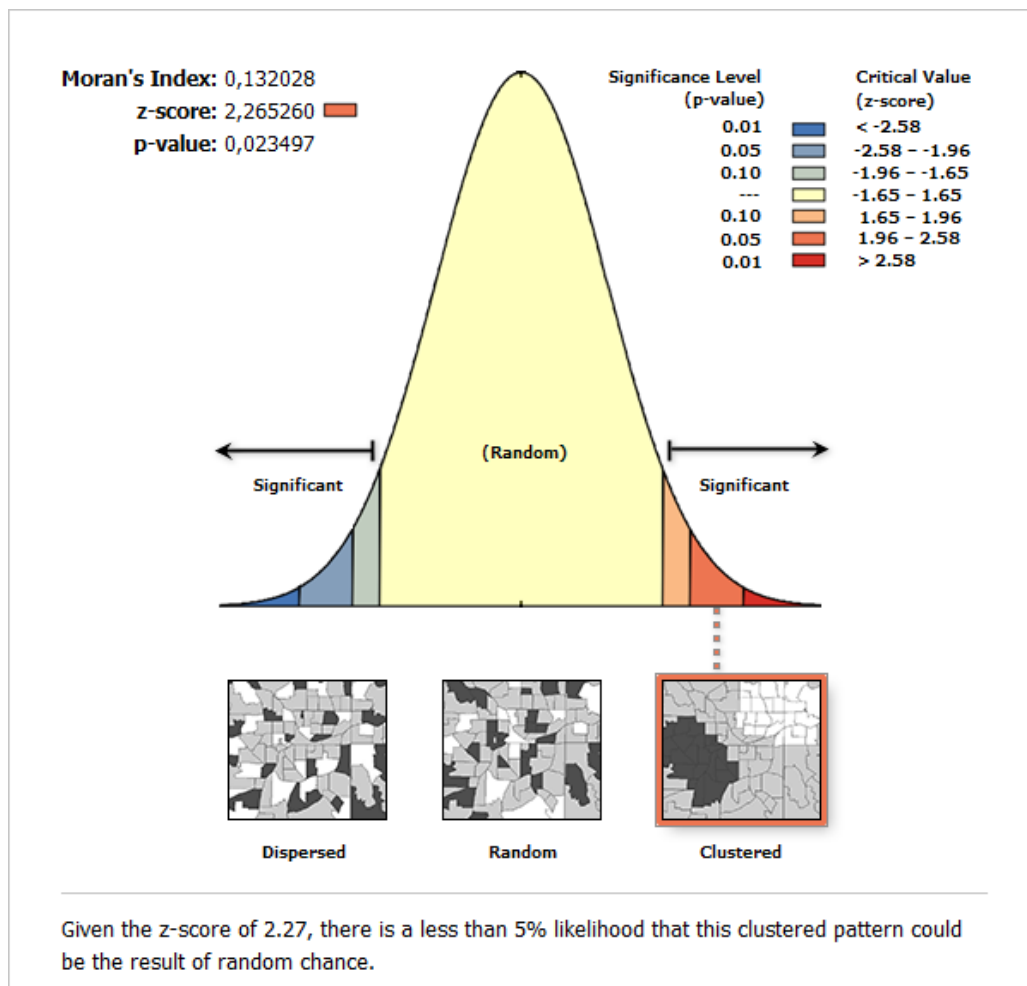


Figura 15. Resultados del cálculo del Índice Moran's I.

5.3.4 PATRONES DE DATOS – ÍNDICE GETIS-ORD GENERAL G

Se calculó el índice de Getis-Ord General G, que indica si existen agrupaciones de datos, y en qué amplitudes de datos suceden las mismas. Los resultados, apreciables en la Figura 16, muestran agrupaciones en los valores altos. La significancia para la probabilidad de agrupamiento de es alta, con una probabilidad menor al 1% de que el patrón observado sea de origen aleatorio.

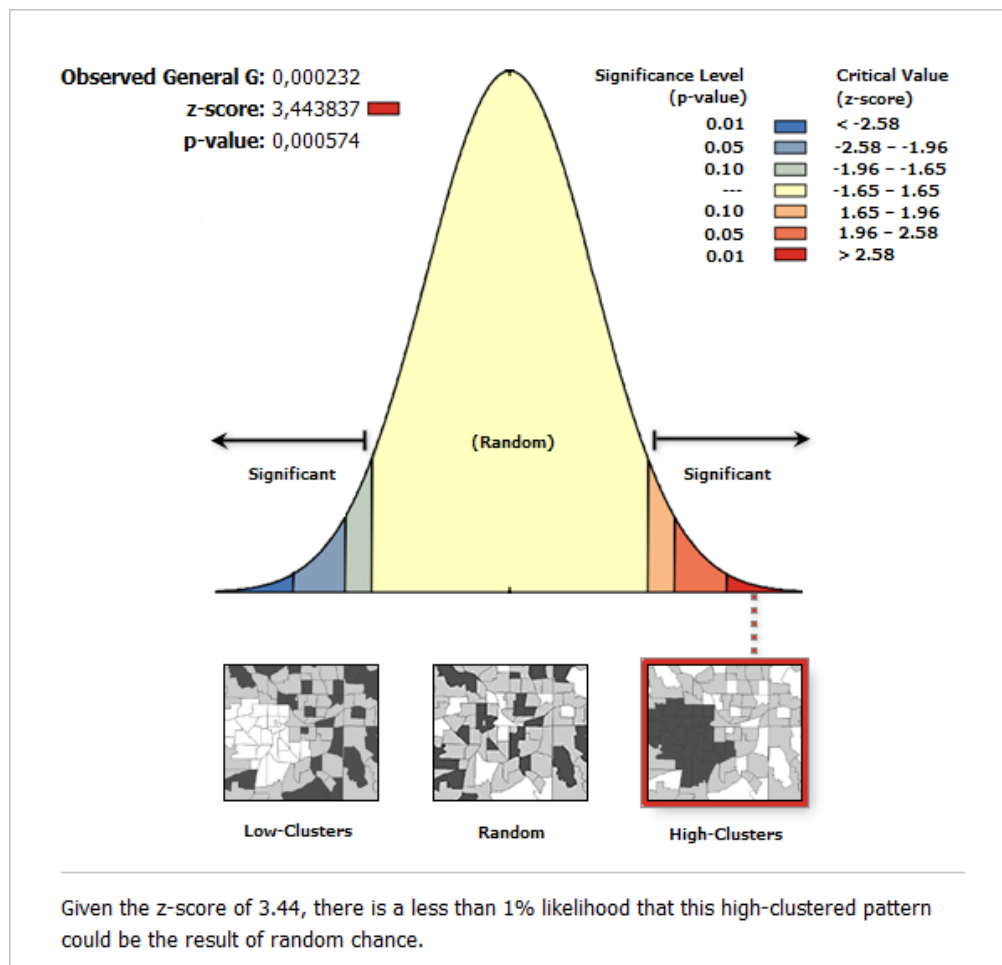


Figura 16. Resumen de datos resultante del cálculo del índice Getis-Ord General G.

Para tener una idea más clara sobre la ubicación de estos agrupamientos, se generó un mapa de *hot spots*, basado en Getis-Ord G. Se calcula para cada punto el residual con respecto a la media, marcando como puntos calientes aquellos en los cuales los residuales se encuentran dos desviaciones estándar por encima o por debajo de la misma. El mapa resultante se presenta en la Figura 17, y muestra con mucha claridad que los conglomerados de datos con valores especialmente altos se encuentran en las zonas de El Bosque y Cortaderal. Aunque no se han realizado análisis que asocien las dos variables, las observaciones empíricas realizadas demuestran la coherencia de los resultados observados con aquellas áreas donde al momento del levantamiento de los datos habitaban algunas familias, que hacen uso del área, sobre todo con actividades ganaderas.

Por el contrario, el área de la Laguna del Otún, así como la zona de Bagaseca, muestran puntos por debajo del promedio, lo que llama la atención para el área de Bagaseca, donde se ha presentado históricamente intervención humana. Nuevamente, la explicación de estas fuertes variaciones locales puede deberse a la presencia de pequeños humedales aislados que se encuentran en muy buen estado de conservación. Este aislamiento puede ser explicado por la topografía de la zona, donde el aspecto predominante del relieve son las colinas bajas con fuertes inclinaciones, producto del flujo de lava que del Nevado del Quindío descendió hacia el río Otún hace alrededor de 2000 años.

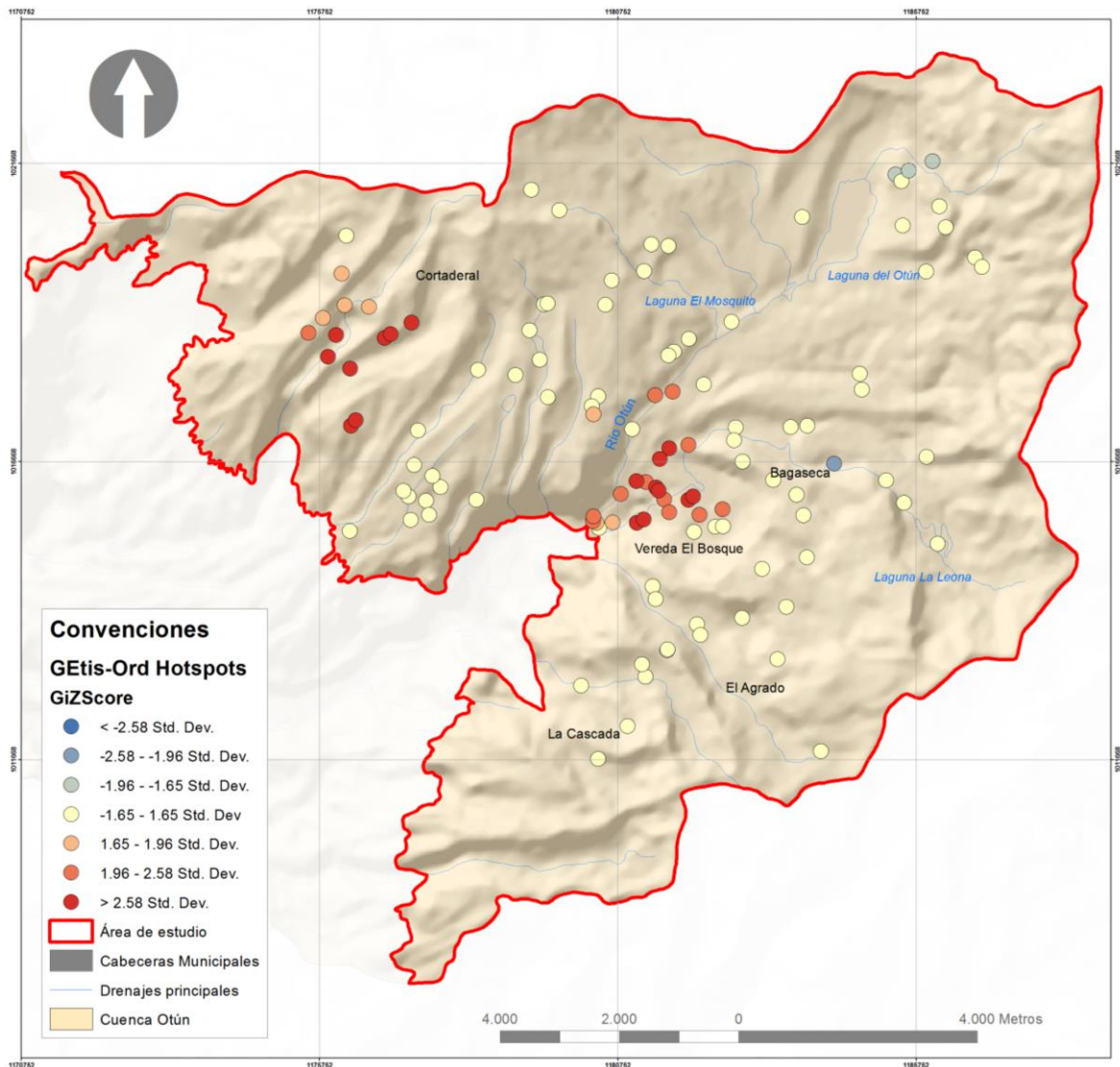


Figura 17. Mapa de *Hot Spots* (Puntos Calientes) de impactos sobre los humedales en el área de estudio

5.3.5 PATRONES DE DATOS – VECINO MÁS PRÓXIMO (NEAREST NEIGHBOR)

Con el fin de confirmar lo hallado hasta el momento, se hizo un análisis de vecino más próximo, con lo que se encontró, según la figura Figura 18, que los puntos se encuentran significativamente agrupados.

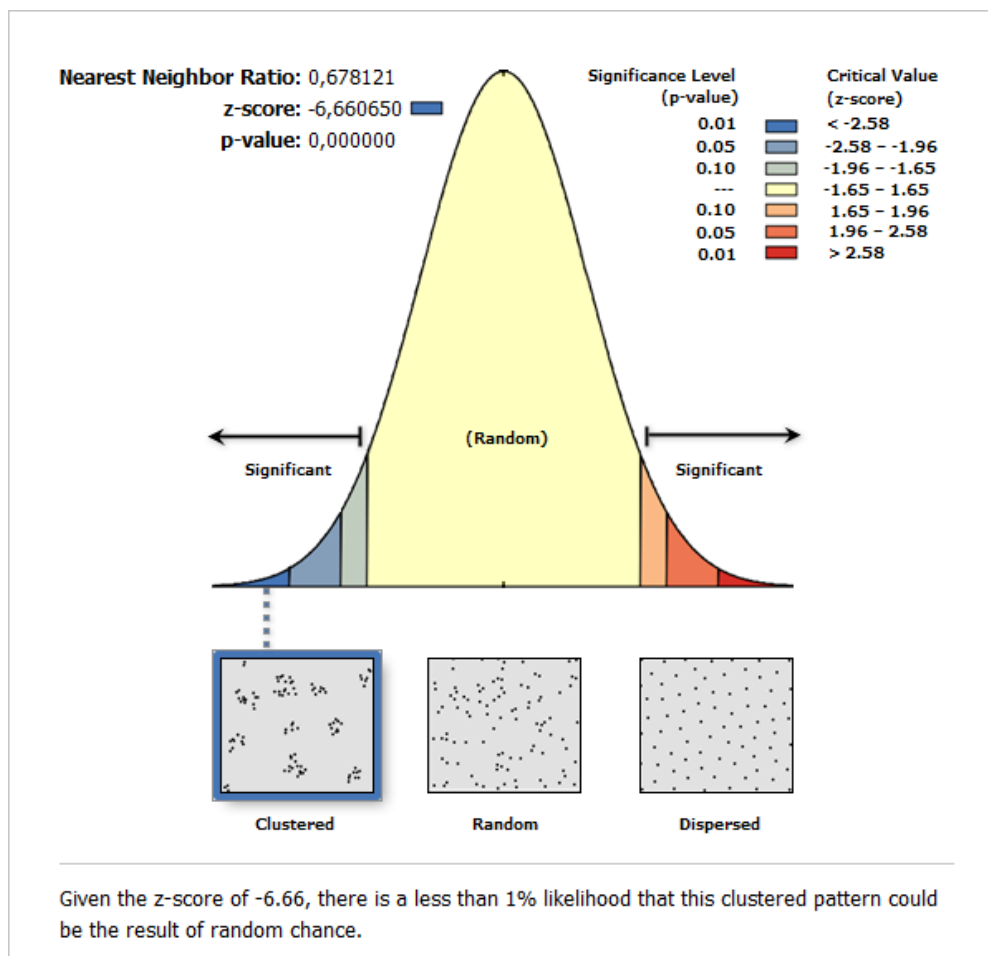


Figura 18. Resultados del análisis de vecino más próximo.

5.4 PREDICCIÓN ESPACIAL MEDIANTE INTERPOLACIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la predicción espacial elaborada mediante técnicas determinísticas y probabilísticas, para los impactos totales ponderados en los humedales de la cuenca alta del río Otún.

5.4.1 INTERPOLACIÓN DETERMINÍSTICA – INTERPOLACIÓN INVERSA A LA DISTANCIA (IDW)

Se llevó a cabo el proceso de interpolación inversa a la distancia, utilizando como variable la calificación total ponderada y normalizada para los impactos que se presentan sobre los humedales en la cuenca alta del río Otún.

Los parámetros utilizados para correr el modelo en ArcGIS 10.1 fueron los que se presentan en la tabla Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros utilizados para el IDW.

PARÁMETRO	VALOR
Potencia	3
Tipo de vecindad	Standard
Máximo de vecinos	50
Mínimo de vecinos	20
Tipo de Sector	8 sectores

La potencia de tres (3) fue elegida dado que representaba muy bien el comportamiento empírico de los datos, dado que, como ya se ha visto, los humedales se encuentran agrupados y además presentan variaciones locales, por lo cual el decrecimiento de los valores con la distancia debía ser una potencia más fuerte de lo recomendado por el software (Koch and Cabrera, 2010).

De la misma forma, se aumentó el número de vecinos, tanto máximo como mínimo, para mantener el carácter general del modelo, sin dejar de reflejar las variaciones locales, pero sin permitir que se convirtiera en una serie de “islas” dispersas por el área de estudio.

Finalmente, otro parámetro que se cambió fue el del tipo de sector, eligiendo para este caso el trabajo con ocho (8) sectores, lo que permite mantener bien las variaciones locales, dando cuenta de la alta agrupación que presentan los datos espacialmente y en su contenido. En la Figura 19 se presenta el resultado de la modelación con IDW.

El resultado obtenido refleja de buena manera las particularidades observadas en los datos anteriormente, tanto en términos de agrupación como en términos de distribución de los valores adquiridos por la variable. Se mantiene coherencia con los puntos calientes ya observados, y aparecen otras regiones con impactos de moderados a severos, como la zona de La Leona. Debe aclararse que la superficie obtenida es de tipo subjetivo, como se mencionó ya en la metodología.

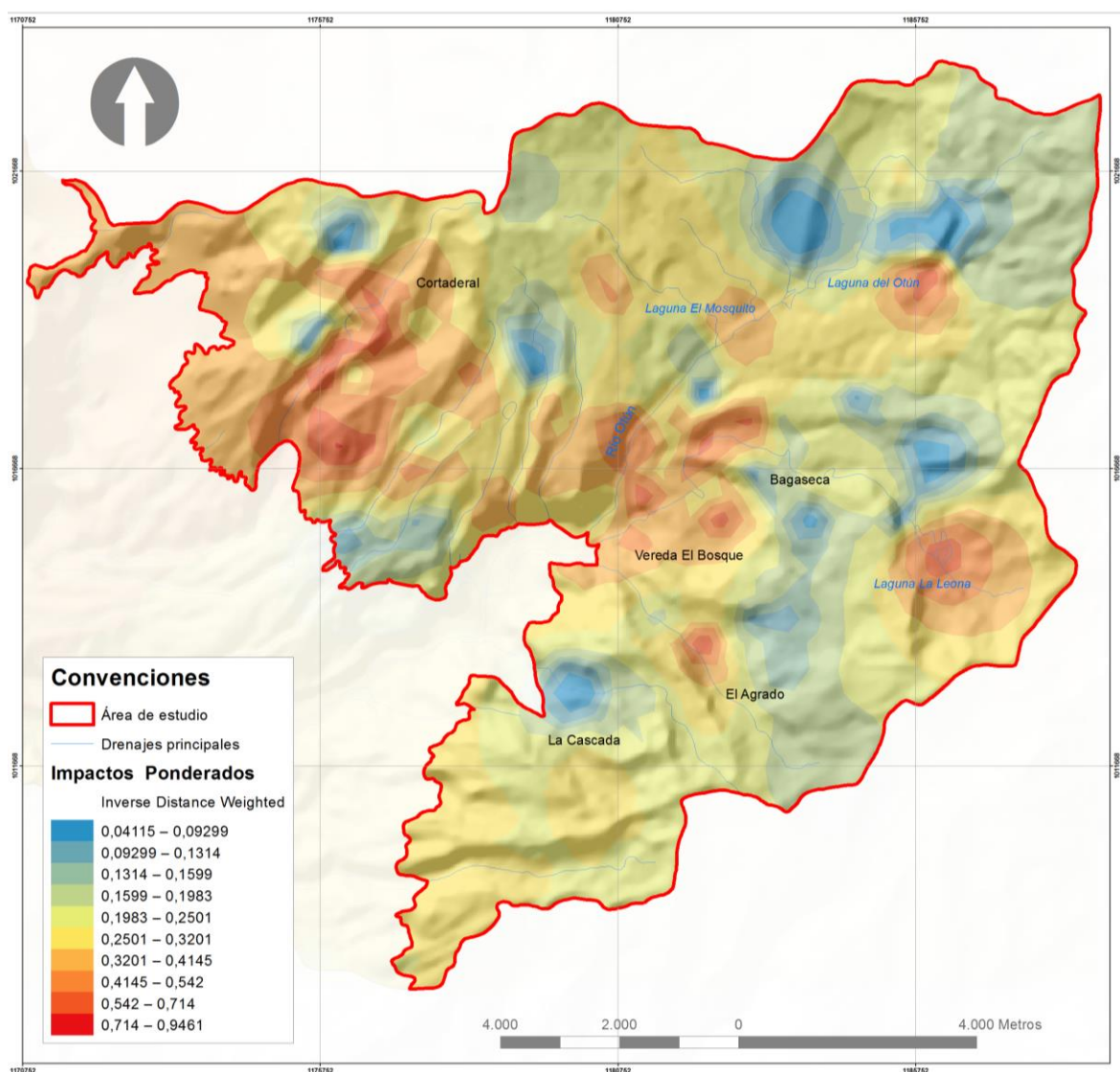


Figura 19. Impactos sobre los humedales en la cuenca alta del río Otún. Interpolación de datos mediante *Inverse Distance Weighting* (IDW).

En cuanto al comportamiento de la variable, es apreciable como crítica la situación en la zona de Cortaderal, donde los impactos alcanzan valores altos, especialmente en la zona de menor altitud, donde se observan transformaciones serias sobre los ecosistemas de humedal. Los procesos de conservación en la Laguna del Otún se ven reflejados parcialmente, con alteraciones por las actividades que se presentan al Norte, en los Pantanos de Santa Isabel y cerca de la Asomadera, de turismo y ganadería – Según evidencias levantadas en trabajo de campo (Duque et al., 2002; Restrepo et al., 2005) y por actividades de ganadería en la zona de La Alsacia y El Silencio, al Este. Este último caso se observa como crítico, dada la influencia de un camino importante, que conduce hacia el Departamento del Tolima.

5.4.2 INTERPOLACIÓN PROBABILÍSTICA – INTERPOLACIÓN INVERSA A LA DISTANCIA (IDW)

5.4.2.1 ANÁLISIS DE TENDENCIA

El análisis de tendencia es una nube de puntos, que para el caso de ArcGIS 10.1 se dibuja en tres dimensiones, donde se ubican los puntos según el valor adoptado por la variable en el eje Z, en función de las coordenadas en X y en Y.

En la Figura 20 puede observarse la existencia de tendencias en ambos ejes, para los datos de impactos sobre los humedales. En el Eje X, existe una tendencia lineal, global, muy tenue, según la cual en la medida en que nos movemos por el eje X podemos observar mayores impactos sobre los humedales, y otra, de carácter polinómica de primer orden, que muestra que los datos con valores más altos se agrupan hacia el centro de la zona de estudio en el eje Y.

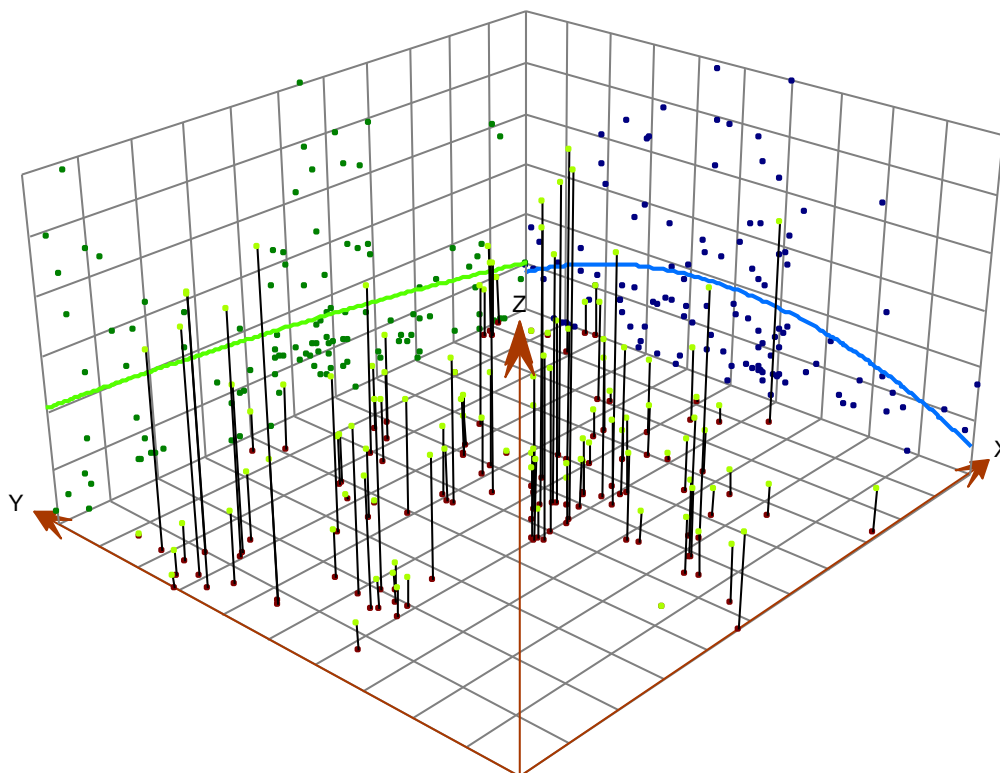


Figura 20. Gráfico de análisis de tendencia de los datos de impactos para los humedales en el área de estudio.

Según lo anterior, se debe optar por un proceso de Kriging que asuma la existencia de tendencias en los datos, para evitar que las mismas generen ruido en cuanto a los valores adoptados por la variable.

5.4.2.2 ANÁLISIS DEL SEMIVARIOGRAMA Y AJUSTE A UN MODELO ÓPTIMO

Se generó un semivariograma (Figura 21), en el cual pueden apreciarse las relaciones entre todos los pares de puntos del área de estudio, y es evidente que en la medida en que aumenta la distancia entre ellos, la varianza también presenta un aumento, en promedio, hasta alcanzar el punto de meseta.

La meseta se alcanza aproximadamente a una distancia de 500 metros, mostrando que la relación entre puntos es moderadamente fuerte en la distancia.

En el proceso de generación de la superficie interpolada, se hace un análisis al semivariograma para revisar cuál es el modelo óptimo al que se adapta, encontrando, como se muestra en la Figura 22, que el modelo K-Bessel es el mejor para este caso, coincidiendo con las recomendaciones de la Escuela de Salud Pública de Harvard (Harvard School of Public Health, 2013) para trabajar en superficies con ruido. En particular, este modelo conocido como el modelo de Matern, tiende a producir superficies que son más suaves localmente, es decir, en un a escala muy fina, que las producidas por otros modelos como el exponencial o el esférico.

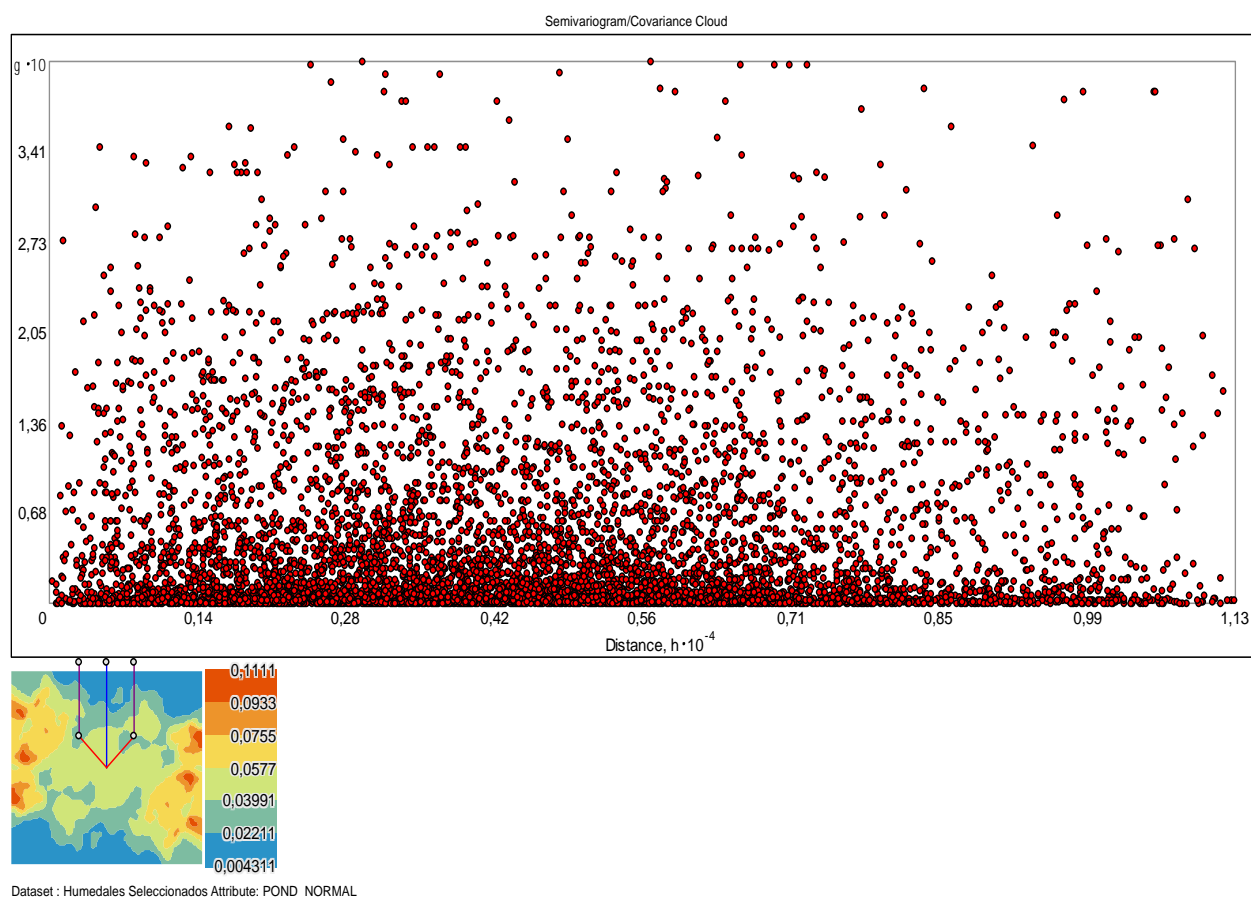


Figura 21. Semivariograma mostrando la relación entre todas las parejas de puntos en el área de estudio.

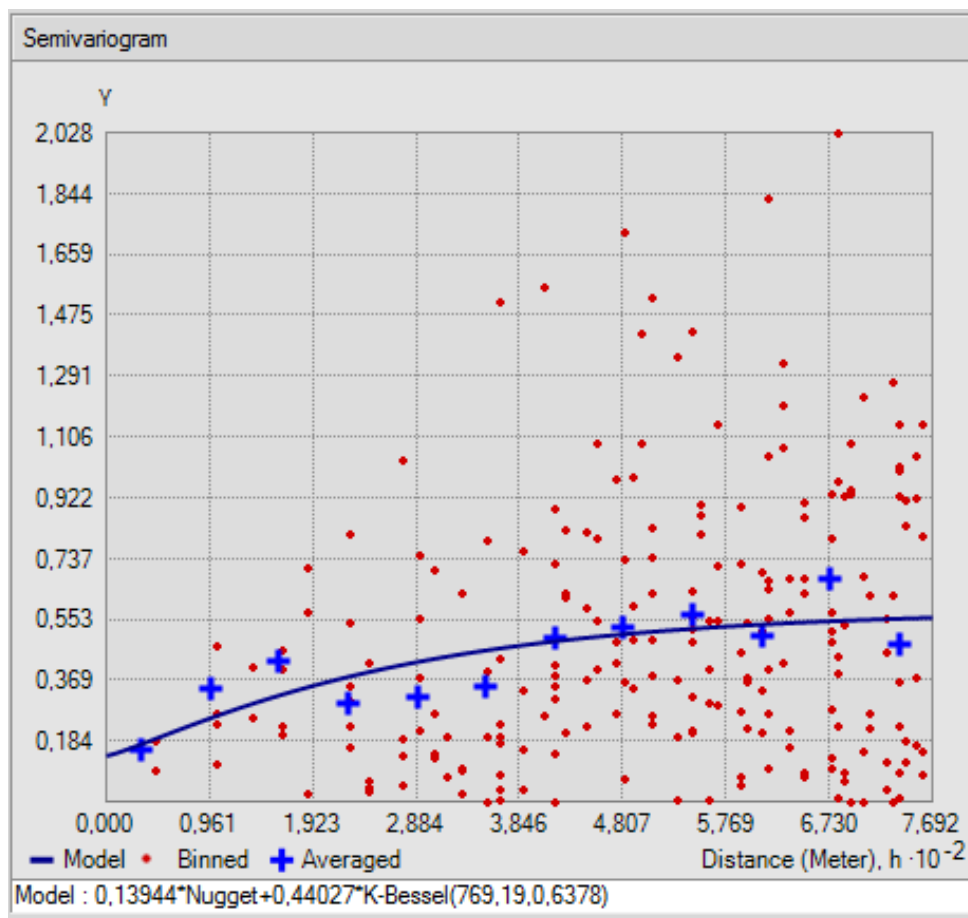


Figura 22. Ajuste del variograma empírico optimizado al modelo teórico K-Bessel.

5.4.2.3 ELABORACIÓN DEL MAPA DE PREDICCIÓN

Para la interpolación se eligió el Kriging Simple, con una transformación logarítmica, que aproxima nuestros datos a la normalidad, según lo obtenido en la exploración de datos. Se estableció que la remoción de tendencias sería de primer orden, de acuerdo con lo obtenido en el análisis previo.

Se eligió el modelo K-Bessel, que para datos como los que se utilizaron, con evidente agrupación en clusters, genera superficies suavizadas a una escala fina, permitiendo mantener el detalle para sitios donde los puntos se encuentra muy agregados. Las distancia de búsqueda se limitó en cuanto fue posible, dejándola en 850 metros, lo que permite mantener el mejor detalle.

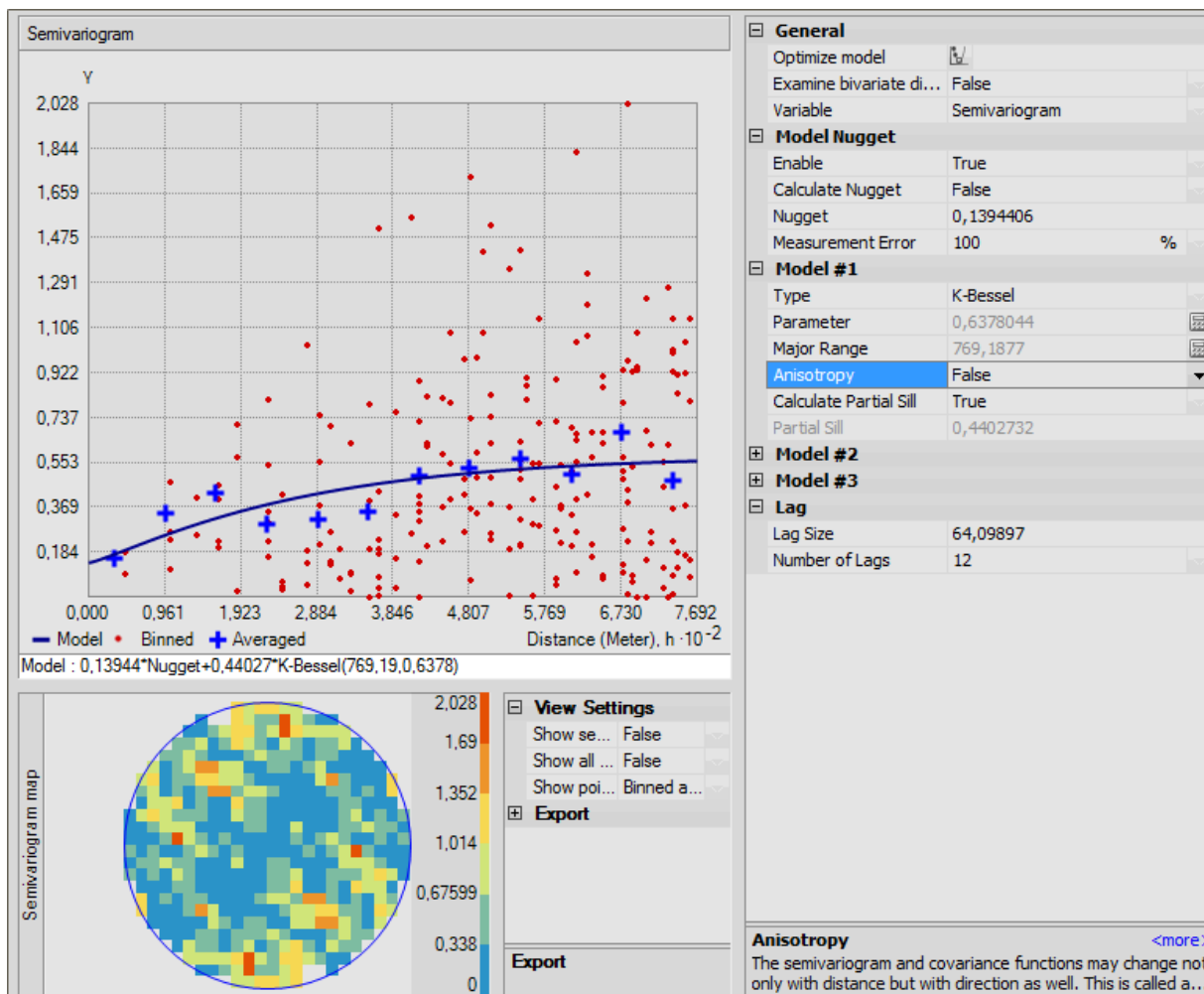


Figura 23. Parámetros utilizados para la construcción de la superficie de predicción.

La superficie generada, que puede apreciarse en la Figura 24, es observable una mayor estabilidad en los datos, y son evidentes las bondades del Kriging, en cuanto a que se tienen en cuenta las relaciones con la totalidad de los puntos que se encuentran en el conjunto de datos. Esto es evidente cuando datos aislados geográficamente que difieren de su entorno no generan variaciones tan dramáticas en sus zonas vecinas, sino que dan lugar a influencias que se atenúan adecuadamente, no solo con la distancia, sino con el estado general de la zona.

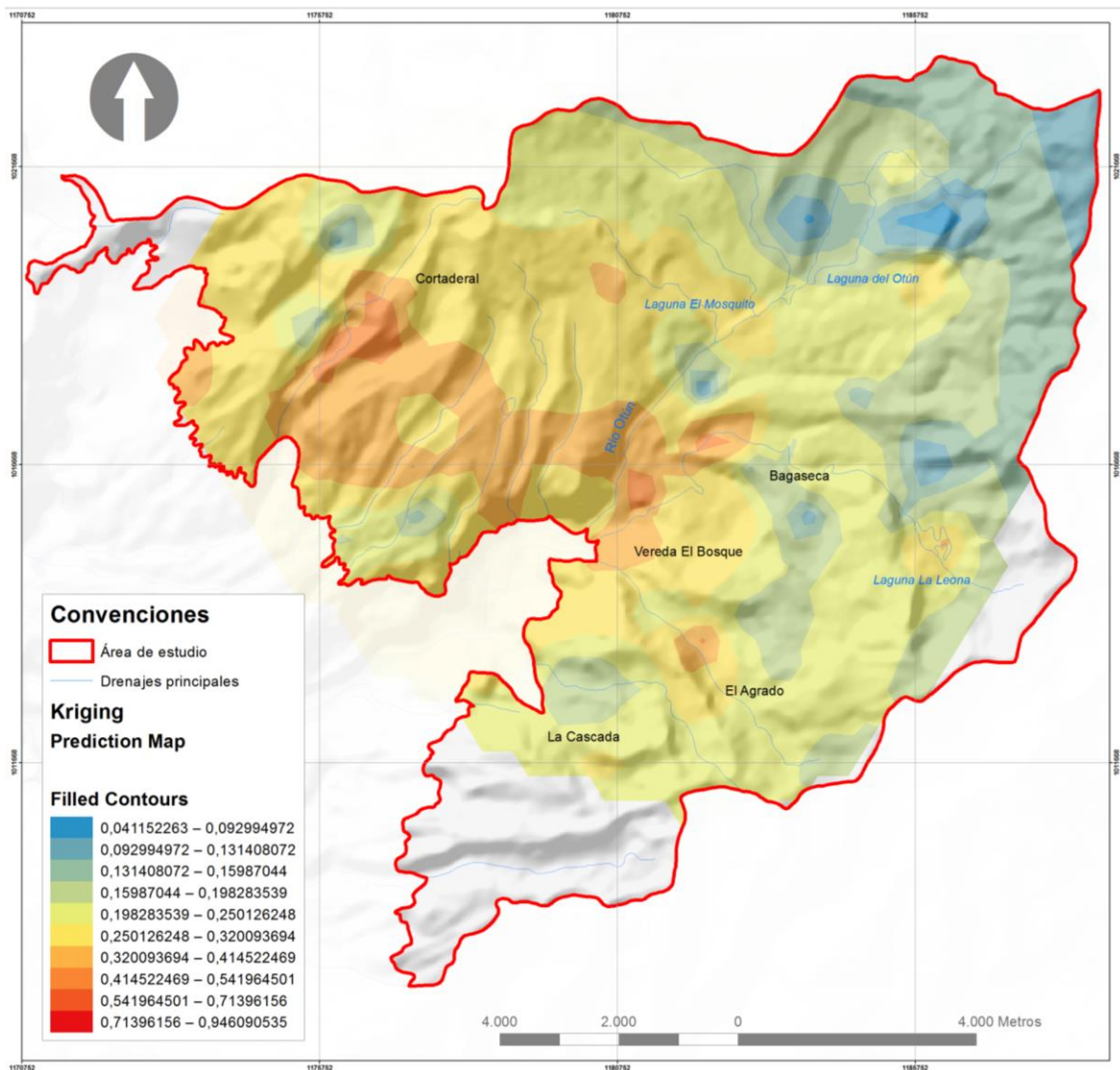


Figura 24. Superficie predictiva de impactos a los humedales en el área de estudio, obtenida con Kriging Simple.

La superficie de predicción, si se le compara con el IDW es, en esencia, menos dramática en cuanto a las transiciones que se presentan, pero más armoniosa en cuanto a la forma en que se agrupan zonas con valores similares, dando cuenta de sus relaciones en el espacio. Un ejemplo de esto es lo que sucede con la zona entre El Bosque y Cortaderal, que en el IDW aparece como una banda que separa las dos áreas con valores más altos en el mapa, apareciendo ambas, a pesar de lo dramático de los valores, como dos islas. Con el Kriging, en cambio, ambas islas aparecen unidas por un “corredor”, que sugiere la existencia de relaciones activas entre ambos sitios. Nuevamente, esto ha sido confirmado de forma

empírica durante el trabajo de campo. Por otro lado, la influencia negativa de los impactos recibidos por los humedales de los Pantanos de Santa Isabel y los Valles de Alsacia, no tienen un efecto regional tan amplio en la zona de la Laguna del Otún, que es en general una zona sin muchos problemas de conservación para los humedales.

La zona de El Bosque presenta diferencias considerables con el IDW, así como la zona de transición con El Agrado. Esto puede ser explicable porque el IDW es un método local, mientras que el Kriging, como se ha dicho ya en este trabajo, da cuenta de las relaciones globales entre puntos. Finalmente, la Figura 25 presenta el mapa de predicción de error estándar, donde se observa que las zonas con menor densidad de puntos tienen los errores más grandes, lo que bien puede ser un efecto de la agrupación de los datos. Estos sitios son señalados, por lo tanto, como zonas que deben ser priorizadas para el muestreo en próximos monitoreos, o haciendo uso de sensores remotos para la observación detallada de sus cambios y desarrollo, como se ha hecho por parte de Nagabhatla et al. (2012), Rebelo et al. (2009) y Jones et al. (2009) entre otros autores.

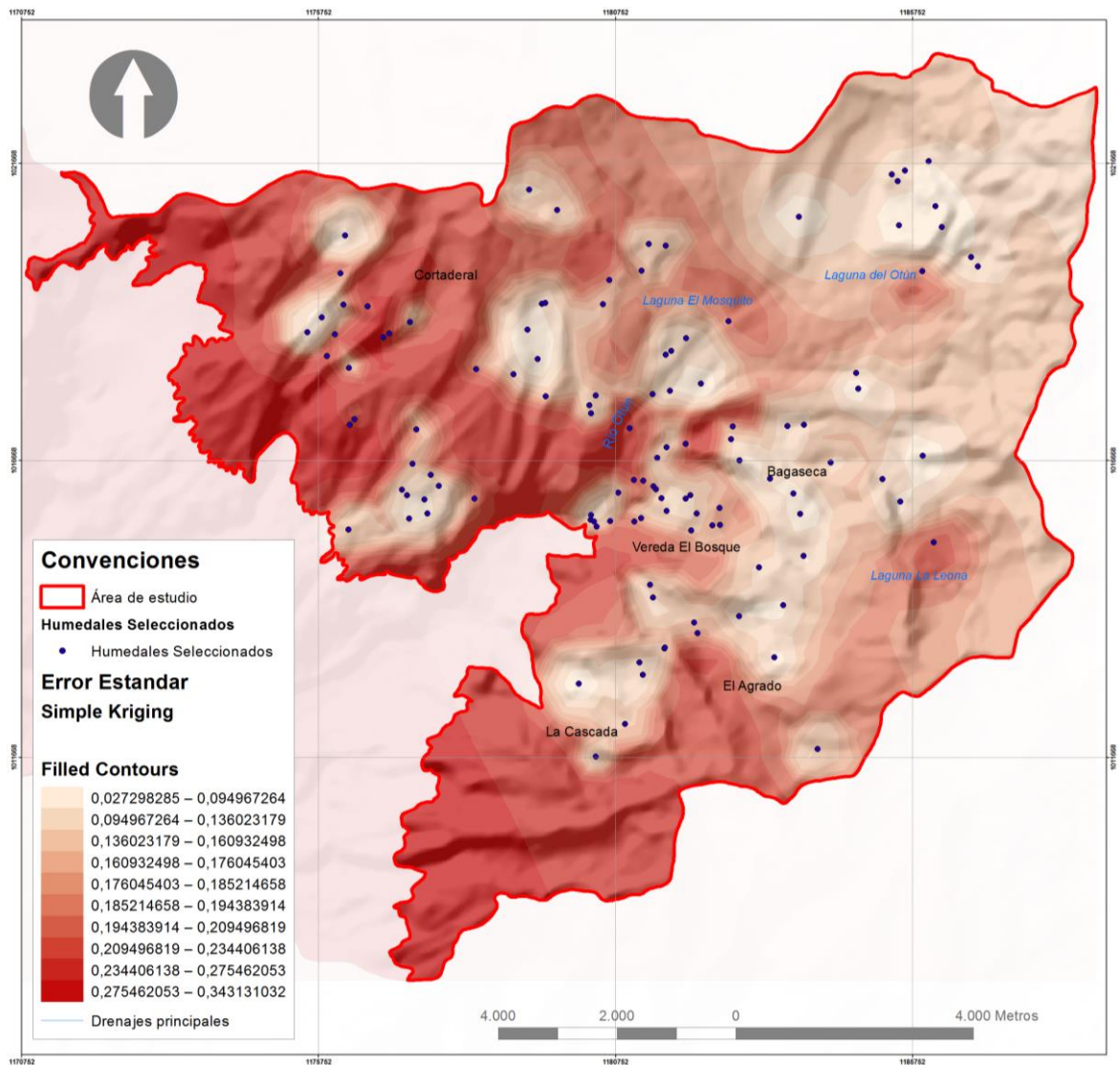


Figura 25. Mapa predictivo de error estándar para la superficie predictiva generada con kriging simple.

6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el inicio del presente trabajo, se planteaba la necesidad de encontrar formas adecuadas para analizar la información existente en torno a los humedales de la cuenca alta del río Otún, como un medio para optimizar la planificación del territorio y del recurso hídrico a futuro. En este sentido, es interesante discutir acerca de la importancia de la información y las posibilidades que actualmente existen para refinar ejercicios como el realizado en 2005 por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A. E.S.P.

En zonas como la Región Andina Colombiana la adquisición de información geográfica de calidad puede tener unos costos elevados, tanto si el levantamiento se hace por medio de trabajo de campo, como si éste se efectúa utilizando sensores remotos. En el momento en que se ejecutaron las actividades de inventario de humedales, en 2005, la información disponible no era abundante, especialmente si hablamos de sensores remotos. El trabajo realizado entrañó dificultades logísticas por la ausencia de este tipo de información, que fueron superadas con el conocimiento del terreno que tenían los funcionarios de esta empresa. La cobertura, sin embargo, se vio limitada por la disponibilidad de rutas y caminos, y los datos levantados pudieron haber adquirido alguna tendencia relativa a este aspecto.

En ocasiones, pareciera que el solo acceso a la información fuera el objetivo, y que un inventario se bastaría por sí mismo como herramienta de gestión. Sin embargo, la información más completa, pero carente de interpretaciones que medien entre la comunidad científica y el resto de la sociedad, pierde vigencia rápidamente; sin análisis que permitan a los expertos en conservación hacerse nuevas preguntas sobre la cambiante realidad de ambientes complejos,

donde influyen tanto los intereses particulares de los actores sociales como los procesos macro derivados del cambio climático global, los datos no estarán sirviendo a ningún objetivo.

Los resultados obtenidos a partir de la misma información levantada y presentada en 2005 por Restrepo et al. demuestran que los datos por sí solos no bastan. En este sentido, se considera que se ha cumplido con la meta de la presente investigación: los análisis espaciales y estadísticos realizados permiten un acercamiento más riguroso a los datos generados, al tiempo que dan la oportunidad de hacerse nuevas preguntas, o responder algunas que estaban pendientes de ser contestadas, y para cuya respuesta no se habían generado argumentos, aun teniendo a mano la información suficiente. Esto se encuentra en consecuencia con lo planteado por Finlayson y Mitchell (1999), cuando dicen que los datos deben tener un carácter científico, que los hará “respetables” en el plano académico, y debidamente soportados en los planos político, económico y social.

Acerca de la utilidad de los procedimientos que aquí fueron explorados para este conjunto de datos, así como de su verdadera “usabilidad” en el contexto de sus limitaciones, debe decirse que la utilidad de los métodos para comprender el territorio y el comportamiento de la variable evaluada en el mismo, no depende de la complejidad de los mismos.

Los métodos más simples, como los análisis para la detección de patrones (Moran’s I, Getis-Ord G, Nearest Neighbor), ya empezaron a aportar información importante, información que en los afanes del trabajo de campo o del procesado rápido para entrega de informes institucionales, no era percibida. Los puntos calientes, para volver sobre el tema, prueban ser una de las herramientas más interesantes para la gestión del territorio, en la medida en que permiten identificar sitios prioritarios para el trabajo, con base en argumentos estadísticos sólidos.

Como ejemplo de lo anterior, se puede revisar la discusión alrededor de una pregunta que surgió durante conversaciones con funcionarios de Aguas y Aguas: “*¿Se concentran los impactos sobre los humedales en las zonas de mayor presencia humana?*”. Existía, entonces, una percepción de dispersión en los impactos, que los hacía, en apariencia, independientes de la distribución de la población y los centros de actividad humana.

Las observaciones de campo mostraban que los impactos llegaban mucho más lejos de lo que se podría considerar un “área de influencia” de las zonas pobladas, y por el contrario no existía evidencia de que la relación fuera en este sentido. Los datos generados, con una alta variabilidad en el espacio, ocultaban lo que el mapa de Hot Spots permitió poner en clara evidencia: Los casos con puntajes inusualmente altos para los impactos se encuentran todos en las zonas de Cortaderal y El Bosque, donde conocemos que existen viviendas. Además, se observa cómo hay una tendencia que disminuye a medida que los puntos se alejan de estos “puntos calientes”. Lógicamente, estos hallazgos señalan las tareas por venir: mejorar el sistema de muestreo, hacer censos poblacionales asociados a la ubicación de las viviendas, censos de animales domésticos orientados particularmente al ganado.

La interacción hombre naturaleza que se señala como generadora de esta superficie homogénea que se denomina páramo, debe ser formalizada mediante el uso de variables claramente establecidas y mediante la observación de sus variaciones en dependencia unas de otras. El aumento de la cobertura y la calidad, así como del acceso a sensores remotos es un elemento que seguramente va a potenciar esta tarea, así como la del inventario de humedales en sí mismo.

El reto del inventario de humedales es otra de las grandes tareas que surgen de este ejercicio, no solo porque el mismo pretende rescatar la información para llevarla, a futuro, a los ejercicios de planificación territorial y del recurso hídrico.

Es cierto que CARDER en 2013 ha realizado otros ejercicios de inventario de humedales posteriores al de Aguas y Aguas en 2005. Sin embargo, ninguno de los inventarios de humedales realizados hasta el momento se ha enfocado en cuantificar las características de los mismos. Las preguntas que emergen ya están siendo respondidas en muchos lugares y por muchos autores ¿Cómo trascendemos la barrera de la subjetividad al evaluar la calidad de los humedales? ¿Cómo hacemos una meticulosa, pero rápida evaluación de los impactos que recibe un humedal? ¿Y de sus funciones ecosistémicas, de sus valores para el hombre? ¿Cómo medirlo, cómo modelarlo? Los futuros esfuerzos deben enfocarse en generar esta información para nuestro panorama local, toda vez que retos como el de los factores de cambio globales y locales no dan espera, y los humedales se consolidan cada vez más como recursos que deben ser, no ya reconocidos, sino *gestionados*, como elementos críticos de nuestro desarrollo.

En condiciones ideales, debe trascenderse la presente investigación en varios aspectos. La uniformidad el espacio geográfico y ambiental debe ser estrictamente delimitada, de suerte que se garantice que los datos generados sean adecuados para análisis geoestadísticos. Esto necesariamente se verá reflejado en resultados más consistentes, en términos de obtener menores variaciones del error estimado tras los ejercicios de interpolación espacial. En este sentido, es muy recomendable particionar este espacio reconocido como “relativamente homogéneo” en unidades donde esta homogeneidad sea aún mayor, lo que eliminará la estacionariedad de los datos, y permitirá efectuar análisis más centrados en la variación relacionada con las variables de interés para la investigación.

En condiciones ideales, la recolección de datos de tipo cualitativo debe ser restringida a variables que exijan este tipo de enfoque, mientras que para el resto de variables debe buscarse una aproximación de tipo cuantitativo. Para este fin, y teniendo en cuenta las

restricciones de tiempo y presupuesto que son frecuentes en nuestro medio, es importante avanzar en el diseño de mediciones rápidas y económicas, que faciliten la obtención de índices, a partir de los cuales obtener medidas sintéticas de la realidad de los humedales, sus atributos y los impactos o factores de cambio que los afectan.

Con miras a responder las preguntas que se originan del inventario y evaluación de humedales que aquí se presenta, es importante comprender que los humedales son ecosistemas pulsantes (Mitsch and Gosselink, 1993; Duque and Carranza, 2008; Cowardin et al., 1979), que experimentan cambios en su hidrología y fenología a lo largo del año, en función de variables como el clima. Los factores de cambio y los impactos que reciben los humedales, de la misma forma, pueden variar estacionalmente. De aquí la importancia de efectuar monitoreos de estos ecosistemas en los diferentes períodos del año correspondientes a períodos estacionales correspondientes a un régimen bimodal de precipitación, para establecer con claridad estas variaciones.

Con respecto a los resultados obtenidos mediante los análisis espaciales, es importante considerar que los mismos pueden ser engañosos, sobre todo en la medida en que las personas involucradas desconozcan las áreas en que se trabaja y desconozcan los requisitos que se tienen para poder usar los distintos análisis que ofrecen los SIG.

Si se compara el análisis IDW hecho por Restrepo en 2005 con aquel que se ha efectuado para el presente trabajo, se encontrará que tienen diferencias significativas. Estas diferencias reflejan el papel que desempeñan, en el acceso a la información, el conocimiento de los métodos y parámetros como condiciones para interpretar el territorio.

El ejercicio de Kriging resultó revelador, en cuanto una rápida comparación de los mapas generados con aquellos que usaron IDW, muestra que el Kriging refleja de manera muy

clara la relación que existe entre los diferentes puntos del área de estudio. Aunque los mapas sean menos “bellos” en cuanto a la intensa variación de colores (y de estados de la variable) que presenta el IDW, el kriging nos ofrece un panorama más coherente desde el punto de vista ambiental, lo que viene del enriquecimiento del modelo que viene de incorporar la autocorrelación de los puntos de datos. La autocorrelación entrega la posibilidad de comprender los patrones espaciales, y esto nos lleva a entender la forma en que los puntos interactúan en el ambiente. Por eso áreas que aparecían aisladas en el IDW, en el Kriging se encuentran conectadas, lo que desde la perspectiva de los sistemas cambia el panorama del análisis.

En resumen, dadas unas condiciones previas que permitan efectuar análisis geoestadísticos, el kriging es para nuestro caso, la mejor opción para el análisis de la información generada, dado que es la técnica que mejor refleja las condiciones de la zona en cuanto a la temática estudiada, confiriendo a los datos una globalidad muy apropiada para el análisis de lo que se denomina ambiente, esa interacción compleja y profunda entre los elementos que componen los medios natural, social y construido. El kriging permite, por lo tanto, hacer reflexiones más profunda sobre los procesos ambientales, mientras que el IDW se limita a la ilustración de las manifestaciones del fenómeno. Dentro de la interpolación por medio del kriging universal, el modelo de Bassel para el análisis de las relaciones entre los puntos, prueba ser la mejor opción, en tanto que permite definir mejor las tendencias globales presentes en el comportamiento de la variable estudiada, a la vez que conserva los elementos fundamentales para la comprensión de las variaciones locales.

A futuro, puede resultar interesante trascender la globalidad de este análisis, para efectuar interpolaciones aplicadas de manera más concretas a zonas que vale la pena observar a mayor escala, como las de Cortaderal y El Bosque, con el fin de entender las dinámicas

locales que se manifiestan en un conjunto de factores de cambio que operan sobre los humedales.

Finalmente, es bueno terminar este ejercicio con una reflexión sobre el papel de la estadística espacial en la sociedad de la información, al servicio de la conservación y gestión de los recursos que son importantes para las más fundamentales actividades del ser humano. La estadística espacial permite sacar provecho a los datos y convertirlos en información. La Estadística espacial cierra brechas para hacer posible la gestión que apunta a mejorar nuestra sostenibilidad y a prolongar nuestra vida con bienestar en este planeta.

7 CONCLUSIONES

- Se efectuaron análisis espaciales para un total de 117 puntos de monitoreo de humedales, distribuidos en un área de páramo de 141.658 hectáreas.
- La magnitud de los impactos recibidos, en promedio, fue de un 0,289, con base en una escala entre 0 y 1. La mediana fue de 0,22 y la desviación típica fue de 0,216.
- Los datos presentaron una distribución Log-normal, con la posibilidad de acercarse a la normalidad tras una transformación logarítmica.
- Según los polígonos de Voronoi, existe mucha entropía en los datos, pero tras analizar las medias, se observan altos valores en los polígonos de El Bosque y Cortaderal.
- Según el Índice Moran's I, los datos presentan una agrupación medianamente significativa, en cuanto a su contenido.
- Según el índice Getis-Ord General G, se presenta un patrón de agrupamiento con alta significancia para las altas calificaciones de la variable.
- Un análisis de puntos calientes (*Hot Spots*) muestra que los datos que se encuentran significativamente por encima de la media se encuentran en la parte alta de Cortaderal y en El Bosque.
- El patrón de agrupamiento se confirma con la el análisis de vecino más próximo, que da significativamente agrupado.
- La interpolación determinística con IDW dio como resultado un mapa relativamente bien ajustado a las condiciones observadas empíricamente en campo, con zonas altamente degradadas en Cortaderal (Parte alta y parte baja), El Bosque, Bagaseca, La Leona y El Agrado.
- Se presentó la tendencia a conformar polígonos aislados (“ojos de buey”).

- La superficie de predicción generada con Kriging se presenta muy acertada, pues da cuenta de las variaciones pero generaliza con base en relaciones espaciales a escala de la cuenca.
- Se resalta nuevamente El Bosque y Cortaderal como zonas críticas para la intervención por los procesos de deterioro de humedales que allí se presentan. Se presenta una clara interacción entre ambos sitios, evidente en la superficie de predicción.
- Lo anterior hace que el Kriging sea una herramienta de gran interés para la interpretación de las condiciones ambientales.
- En lugares y momentos en que es costoso adquirir información, o bien ante la facilidad de adquirirla, es de enorme importancia contar con la capacidad para hacer un adecuado análisis con herramientas SIG, dado que permite obtener lo mejor de la información mediante interpretaciones óptimas.
- Existen dificultades en el levantamiento de información que deben ser superadas para poder hacer un uso eficaz de las herramientas SIG, en pleno cumplimiento de los supuestos de la geoestadística.
- Mantener el monitoreo de humedales en el tiempo es un reto actual. La red debe densificarse haciendo uso de tecnologías como los sensores remotos.
- Es importante refinar los modelos para obtener información cuantitativa en los humedales, trascendiendo los criterios subjetivos para la obtención de información cualitativa. Pueden buscarse modelos que incorporen los dos tipos de variable.
- El correcto uso de las herramientas SIG cierra brechas importantes en la gestión de los humedales, mejorando las posibilidades para su conservación y uso inteligente.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Arieira, J., Karssenber, D., de Jong, S.M., Addink, E.A., Couto, E.G., Nunes da Cunha, C., Skøien, J.O., 2011. Integrating field sampling, geostatistics and remote sensing to map wetland vegetation in the Pantanal, Brazil. *Biogeosciences* 8, 667–686. doi:10.5194/bg-8-667-2011
- Bedoya, E., Restrepo, S., 2001. Humedales La Palmilla - Frascate. Características, Estado Actual y Plan de Acción Ambiental. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Bullock, A., Acreman, M., 1999. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 7, 358–389.
- Castillejo, A.M., 2007. Teoría geoestadística aplicada al análisis de la variabilidad espacial arqueológica intra.site. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Chauvet, P., 1994. Aide-memoire de géostatistique minière.
- Chopra, R., Verma, V.K., Sharma, P.K., 2001. Mapping, monitoring and conservation of Harike wetland ecosystem, Punjab, India, through remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 22, 89–98. doi:10.1080/014311601750038866
- Clare, S., Creed, I.F., 2013. Tracking wetland loss to improve evidence-based wetland policy learning and decision making. *Wetl. Ecol. Manag.* doi:10.1007/s11273-013-9326-2
- Cowardin, L.M., Carter, V., Golet, F.C., La Roe, E.T., 1979. Classification of Wetland and Deep Water Habitats.
- Cressie, N., 1984. Towards Resistent Geostatistics, in: *Geostatistics for Natural Resources Characterization*. Dordrecht: Reidel.
- Cuatrecasas, J., 1958. Aspectos de la Vegetación Natural de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exactas Físicas Nat.* 10, 221–268.
- Duque, A.A., Carranza, J.A., 2008. Los Humedales: Conceptos y Contextos, in: *Los Humedales En Risaralda: Una Perspectiva Ecosistémica*. Fondo Editorial de Risaralda J.M.V.C., Pereira, pp. 17–32.
- Duque, A.A., Restrepo, S., Carranza, J.A., 2008. Los Humedales en la Cuenca Alta y Media del Río Otún, Risaralda, in: *Los Humedales En Risaralda: Una Perspectiva Ecosistémica*. Pereira.
- Duque, A.A., Restrepo, S., Ruiz, P., Domínguez, A.L., Beltrán, A., 2002. Inventario y Caracterización de los Humedales del Parque Nacional Natural los Nevados y Zona Amortiguadora en los Departamentos de Caldas y Risaralda. (Informe Técnico). CARDER – CRQ – CORTOLIMA – CORPOCALDAS - UAESPNN – Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

- Finlayson, C.M., D’Cruz, R., Davidson, N., 2005. Ecosystems and human well-being: wetlands and water : synthesis, Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. World Resources Institute, Washington, D.C.
- Finlayson, C.M., Mitchell, D.S., 1999. Australian wetlands: the monitoring challenge. *Wetl. Ecol. Manag.* 7, 105–112.
- Finlayson, C.M., Van der Valk, A.G., 1995. Wetland classification and inventory: a summary. *Vegetatio* 118, 185–192.
- Florez, A., 2000. Geomorfología de los Páramos, in: Colombia, Diversidad Biótica III. La Región de Vida Paramula. Universidad Nacional de Colombia - Instituto Alexander von Humboldt.
- García, F.M., 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Rev. Ecosistemas* 13.
- Giraldo H., R., 2003. Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Gutzwiller, K.J., Flather, C.H., 2011. Wetland features and landscape context predict the risk of wetland habitat loss. *Ecol. Appl.* 21, 968–982.
- Haining, R., 2004. *Spatial Data Analysis, Theory and Practice*. Cambridge University Press.
- Hartkamp, A.D., De Beurs, K., Stein, A., White, J.W., 1999. Interpolation techniques for climate variables. CIMMYT Mexico, DF.
- Harvard School of Public Health, 2013. Kriging: Kriging with ArcGIS [WWW Document]. *Geogr. Inf. Syst. GIS Public Health Res.* URL <http://www.hsph.harvard.edu/gis/arcgis-tips/kriging/> (accessed 11.25.13).
- Hengl, T., 2009. A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables, 2nd ed, EUR 22904 EN Scientific and Technical Research series. University of Amsterdam Publications Office, Luxembourg.
- Janssen, R., Goosen, H., Verhoeven, M.L., Verhoeven, J.T.A., Omtzigt, A.Q., Maltby, E., 2005. Decision support for integrated wetland management. *Environ. Model. Softw.* 20, 215–229. doi:10.1016/j.envsoft.2003.12.020
- Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., Neil, L., 2003. *Using ArcGIS 9 Geostatistical Analyst*.
- Jones, K., Lanthier, Y., van der Voet, P., van Valkengoed, E., Taylor, D., Fernández-Prieto, D., 2009. Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: The GlobWetland project. *J. Environ. Manage.* 90, 2154–2169. doi:10.1016/j.jenvman.2007.07.037

- Junk, W.J., An, S., Finlayson, C.M., Gopal, B., Květ, J., Mitchell, S.A., Mitsch, W.J., Robarts, R.D., 2012. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquat. Sci.* 75, 151–167. doi:10.1007/s00027-012-0278-z
- Koch, A., Cabrera, P., 2010. Interpolación Determinista.
- Landim, P.M.B., Sturaro, J.R., 2002. Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. *Geomatemática, Texto Didático* 6.
- Legendre, P., 1993. Spatial autocorrelation: Trouble or New Paradigm? *Ecology* 74, 1659–1673.
- LePage, Ben A. 2011. *Wetlands: Integrating Multidisciplinary Concepts*. Springer.
- Li, H., Calder, C., Cressie, N., 2007. Beyond Moran's I: Testing for Spatial Dependence Based on the Spatial Autoregressive Model. *Geogr. Anal.* 39, 357–375.
- Li, J., Heap, A.D., 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia*, Canberra.
- Li, J., Heap, A.D., 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecol. Inform.* 6, 228–241. doi:10.1016/j.ecoinf.2010.12.003
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W., 2005. *Geographical information systems and science*. Wiley, Chichester.
- Lyon, J.G., 2001. *Wetland Landscape Characterization GIS, Remote Sensing and Image Analysis*. CRC Press, London.
- Maltby, E., 1991. Wetland management goals: wise use and conservation. *Landsc. Urban Plan.* 20, 9–18.
- Maltby, E., Acreman, M.C., 2011. Ecosystem services of wetlands: pathfinder for a new paradigm. *Hydrol. Sci. J.* 56, 1341–1359. doi:10.1080/02626667.2011.631014
- Martín, R.M.B., Nieva, P.L., 1998. Aproximación bibliográfica a los Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Ordenación del Territorio y los Recursos Naturales., in: *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*. p. 319.
- McInnes, R.J., 2007. Integrating ecosystem services within a 50-year vision for wetlands. Unpubl. WWT Rep. Engl. Wetl. Vis. Partnersh. 34.
- McInnes, R.J., 2011. Managing Wetlands for Multifunctional Benefits, in: *Wetlands: Integrating Multidisciplinary Concepts*. Springer.
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., 1993. *Wetlands*, 2nd ed. John Wiley.

- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., 2000. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecol. Econ.* 35, 25–33.
- Mitsch, W.J., Hernandez, M.E., 2012. Landscape and climate change threats to wetlands of North and Central America. *Aquat. Sci.* 75, 133–149. doi:10.1007/s00027-012-0262-7
- Mittermeir, R.A., Myers, N., Thomsen, J.B., 1998. Biodiversity hotspots and major tropical wilderness areas: approaches to setting conservation priorities. *Conserv. Biol.* 12, 516–520.
- Moral García, F.J., 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Rev. Ecosistemas* 13.
- Moran, P.A.P., 1950. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika* 37, 17–23.
- Nagabhatla, N., Finlayson, C., Sellamuttu, S.S., 2012. Assessment and change analyses (1987-2002) for tropical wetland ecosystem using earth observation and socioeconomic data. *Eur. J. Remote Sens.* 215–232. doi:10.5721/EuJRS20124520
- Naranjo, L.G., Andrade, G.I., Ponce de León, E., 1999. Humedales Interiores de Colombia: Bases Técnicas para su Conservación y Uso Sostenible. Instituto De Investigaciones de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”, Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General de Ecosistemas., Bogotá.
- Nogueira, F., Couto, E.G., Bernardi, C.J., 2002. Geostatistics as a tool to improve sampling and statistical analysis in wetlands: a case study on dynamics of organic matter distribution in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. *Braz. J. Biol.* 62, 861–870.
- Nyman, J.A., 2011. Ecological Functions of Wetlands, in: *Wetlands: Integrating Multidisciplinary Concepts*. Springer.
- Olaya, V., 2011. *Sistemas de Información Geográfica*, 2a. ed.
- Ramsar Convention Secretariat, 2013. *The Ramsar Convention Manual: a guide to the convention on Wetlands (Ramsar, Iran, 1971)*, 6th ed. Gland, Switzerland.
- Rebelo, L.-M., Finlayson, C.M., Nagabhatla, N., 2009. Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *J. Environ. Manage.* 90, 2144–2153. doi:10.1016/j.jenvman.2007.06.027
- Restrepo, S., Bedoya, E., 2008. Los Humedales de La Palmilla -Frascate en Risaralda, in: *Los Humedales En Risaralda: Una Perspectiva Ecosistémica*.
- Restrepo, S., Carranza, J.A., Duque, A.A., 2005. *Inventario y Caracterización de Humedales de la Cuenca Media y Alta del Río Otún (Informe Técnico)*. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A. E.S.P., Pereira.

- Richardson, C.J., 1994. Ecological functions and human values in wetlands: a framework for assessing forestry impacts. *Wetlands* 14, 1–9.
- Ruiz, M., López, F., Páez, A., 2009. Testing for spatial association of qualitative data using symbolic dynamics. *J. Geogr. Syst.* 12, 281–309. doi:10.1007/s10109-009-0100-1.
- Sendra, J.B., García, R.C., 2000. El uso de los sistemas de Información Geográfica en la planificación territorial., in: *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*. p. 49.
- Smith, D.R., Ammann, A., Bartoldus, C., Brinson, M.M., 1999. An approach for assessing wetland functions using hydrogeomorphic classification, reference wetlands, and functional indices (Technical Report No. WRP-DE-9), Wetlands Research Program. U.S. Army Corps of Engineers.
- Srinivasan, V., Lambin, E.F., Gorelick, S.M., Thompson, B.H., Rozelle, S., 2012. The nature and causes of the global water crisis: Syndromes from a meta-analysis of coupled human-water studies: NATURE AND CAUSES OF THE GLOBAL WATER CRISIS. *Water Resour. Res.* 48, n/a–n/a. doi:10.1029/2011WR011087.
- Tiner, R.W., 2005. Assessing cumulative loss of wetland functions in the Nanticoke River watershed using enhanced National Wetlands Inventory data. *Wetlands* 25, 405–419.
- Yang, Q., Scholz, M., Shao, J., 2012. Application of spatial statistics as a screening tool for sustainable flood retention basin management: Spatial statistics as a screening tool for flood retention basin management. *Water Environ. J.* 26, 155–164. doi:10.1111/j.1747-6593.2011.00272.x.
- Zedler, J.B., Kercher, S., 2005. WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 30, 39–74. doi:10.1146/annurev.energy.30.050504.144248