

MODELACIÓN ESPACIAL PARA LA UBICACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Juan Carlos Valdés Quintero ¹, Juan Camilo Parra Toro ², Sebastián Herrera Cadavid³

¹Especialista SIG, Doctor (c) en Ingeniería – Énfasis en Modelación Espacial, Profesor Asociado, Grupo ISAIL, jvaldes@elpoli.edu.co

²Especialista en Hidráulica Urbana. Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Profesor Especial, Grupo ISAIL, jcparra@elpoli.edu.co.

³Estudiante de Ingeniería Civil, Grupo ISAIL, sebastian_herrera95103@elpoli.edu.co.

^{1, 2 y 3} Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia

RESUMEN

Como parte del proyecto “*diseño y calibración de una red de estaciones meteorológicas para la evaluación del riesgo hidrológico en la microcuenca de la quebrada La Presidenta*”, se busca definir y cuantificar los parámetros más relevantes para la ubicación técnica de estaciones meteorológicas en la etapa de diseño de la red, con un alcance limitado a cuencas urbanas de media y alta montaña. La metodología propuesta abarca la realización de una adaptación del Proceso de Jerarquías Analíticas, combinada con el uso de diversas herramientas geo-informáticas para la modelación espacial de variables territoriales. Esta permite identificar zonas aptas para la captura de datos meteorológicos empleados posteriormente en la evaluación del riesgo hidrológico. Para el caso de estudio se consideraron ocho criterios y cuatro posibles escenarios de modelación. Los resultados obtenidos resultan ser similares en dos de los escenarios planteados. Se concluye que la metodología propuesta permite obtener resultados consistentes con lo esperado en el terreno, aunque la realidad sobre el proceso de ubicación – principalmente requerimientos logísticos y administrativos - limita en gran medida los lugares para instalar finalmente los dispositivos.

Palabras clave: Geo-informática, AHP, Cuenca Hidrográfica, Simulación, Riesgo, Red Meteorológica.

Recibido: 23 de abril de 2013.

Aceptado: 2 de Diciembre de 2013.

Received: April 23rd, 2013.

Accepted: December 2nd, 2013.

SPATIAL MODELING FOR THE OPTIMAL LOCATION OF METEOROLOGICAL STATIONS IN HYDROGRAPHIC WATERSHEDS

ABSTRACT

As part of the project “design and calibration of a network of meteorological stations for the hydrological risk assessment in the micro-watershed of La Presidenta stream”, the most relevant parameters for a technical location of meteorological stations in the network design stage are defined and quantified, with a limited scope to urban mid and high-mountain watersheds. The proposed methodology involves the development of an Analytical Hierarchy Process adaptation, combined with the use of different Geo-informatics tools for spatial modeling of territorial variables. This allows the identification of suitable zones to capture meteorological data, which will be used in the watershed hydrological risk assessment. For the study case, eight criteria and four possible modeling scenarios were considered. The results are similar in two of the suggested scenarios. As main conclusion, the proposed methodology allows to generate consistent results with those expected in-situ, although reality about location process –mainly administrative and logistic requirements – to a large extent limits the places to finally install the devices.

Keywords: Geoinformatics, AHP, Watershed, Simulation, Risk, Meteorological Network.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del contexto del proyecto “Diseño y calibración de una red de estaciones meteorológicas para la evaluación del riesgo hidrológico en la microcuenca de la quebrada la presidenta”, se planteaba como objetivo general la instrumentación de la microcuenca de la Quebrada La Presidenta, ubicada en la zona suroriental del Municipio de Medellín, mediante el diseño, calibración y puesta en operación de una red de estaciones meteorológicas.

El alcance de este proyecto, en su primera fase, comprende la confección de los protocolos de diseño, calibración y operación de la red, así como la instalación y puesta en funcionamiento de un grupo de estaciones que trabajan en línea, siempre teniendo como enfoque fundamental la generación de información fiable, que en fases futuras (segunda fase para la incorporación de nuevas estaciones y otras variables como infiltración de agua y una tercera fase para el análisis de datos en el tiempo y proyección de modelos), permitan en el mediano plazo esquemas de evaluación del Riesgo Hidrológico en dicha zona. [11], [12], [13], [17], [19]

La microcuenca de la quebrada La Presidenta es de gran interés para la ciudad dado que allí, se vienen desarrollando importantes proyectos de expansión urbana (esta es una de las zonas de la ciudad de Medellín donde el suelo tiene un alto valor comercial); atraviesa importantes vías de comunicación; afecta un gran número de pobladores de diversos estratos sociales y está en una de las zonas de mayor influencia comercial de la ciudad. Los eventos hidrológicos extremos que allí se presenten pueden desencadenar inundaciones y movimientos en masa que afecten en gran medida obras de infraestructura y usuarios en particular.

La realización del proyecto se justifica tras la necesidad explícita que se manifiesta en los diferentes planes integrales de manejo y ordenamiento de microcuencas (PIOM), en el sentido de iniciar acciones en estas zonas tendientes a contar en un futuro cercano con información de alta calidad [5].

Algunas de las actividades específicas del proyecto incluyen el estudio de las diversas variables meteorológicas asociadas al riesgo hidrológico en la cuenca de la quebrada La Presidenta, y el establecimiento de una metodología para el diseño

de redes de estaciones meteorológicas ajustada a características de cuencas de montaña. [2]

El presente trabajo ilustra el proceso de priorización de criterios cotejados desde las variables asociadas al diseño de la red de estaciones meteorológicas y la elaboración metodológica, la cual, soportada desde herramientas Geoinformáticas para la modelación espacial de variables territoriales [7], y que combinadas con el proceso de jerarquías analíticas de Saaty [10], posibilitaron la ponderación pertinente de los diferentes criterios asociados a la posible ubicación de estaciones meteorológicas, garantizando así, la identificación de zonas que cumplen con los requerimientos técnicos para la captura de datos meteorológicos, y que posteriormente podrán ser utilizados para la evaluación del riesgo hidrológico en una cuenca.

2. METODOLOGÍA

Durante la primera etapa del proyecto y después de hacer una indagación de referentes nacionales e internacionales se determinaron variables de orden meteorológico, variables geográficas, geomorfológicas y del suelo, y variables de carácter socio-económico. [3], [6], [9]

Definidas estas variables, se establecieron los siguientes pasos dentro de la metodología para el diseño de la red de estaciones:

- Determinación de la información georreferenciada asociada a las variables descritas y que será utilizada para la modelación de la ubicación óptima de estaciones.
- Definición del modelo a utilizar para el análisis y combinación de variables adaptada a las condiciones particulares de cuencas de montaña.
- Simulación del modelo de ubicación óptima de estaciones y análisis de resultados.
- Conclusiones parciales.

2.1 Definición de la Información Utilizada

Para la consecución de información que pudiese ser asociada a las variables relacionadas, se acudió a entes territoriales del municipio de Medellín, así, como a la Corporación Autónoma Regional del Área Metropolitana de Medellín, encontrando la disponibilidad de mapas

cartográficos básicos y temáticos a escalas 1:100000 y 1:25000 relacionados continuación:

- Construcciones: Un mapa vectorial tipo polígono de las construcciones del municipio producto del levantamiento en campo por parte del Departamento de Catastro.
- Usos del Suelo: Un mapa vectorial tipo polígono de uso del suelos del área de Medellín, derivado de la clasificación de una imagen SPOT multispectral, mejorada con fotointerpretación y trabajo de campo.
- Malla Vial: Un mapa vectorial tipo línea que contiene las vías principales pavimentadas del municipio producto del levantamiento con geodesia satelital por parte de la Secretaría de Transporte.
- Cobertura Vegetal: Un mapa vectorial tipo polígono con los diferentes tipos y zonas de cobertura vegetal derivado de la clasificación de aerofotografía por parte de la CAR del Área Metropolitana.
- Geología: Un mapa vectorial tipo polígono con los diferentes tipos y zonas de estructuras geológicas en los suelos de la zona.

- Amenaza de Deslizamientos: Un mapa vectorial tipo polígono que posee las diferentes zonificaciones de amenazas en movimientos de masa producto de los estudios geológicos y georreferenciados para el municipio. [1]
- Drenajes: Un mapa vectorial tipo línea con los registros de los principales drenajes derivado del análisis estereográfico de aerofotografías por parte de la CAR del Área Metropolitana.
- Pendientes: Un mapa de pendientes del área estudiada expresadas en grados, derivadas de un modelo de elevación digital. (MED). [20]

Cabe mencionar que aunque se disponía de información relevante a la ubicación de instituciones educativas, las cuales se proyectaban como las más apropiadas para la posible ubicación de los instrumentos de medición, por asuntos de seguridad y accesibilidad, no se contaba con información a partir de acceso red de datos convenios de cooperación que permitieran que ésta fuera una capa de relevancia dentro de la modelación.

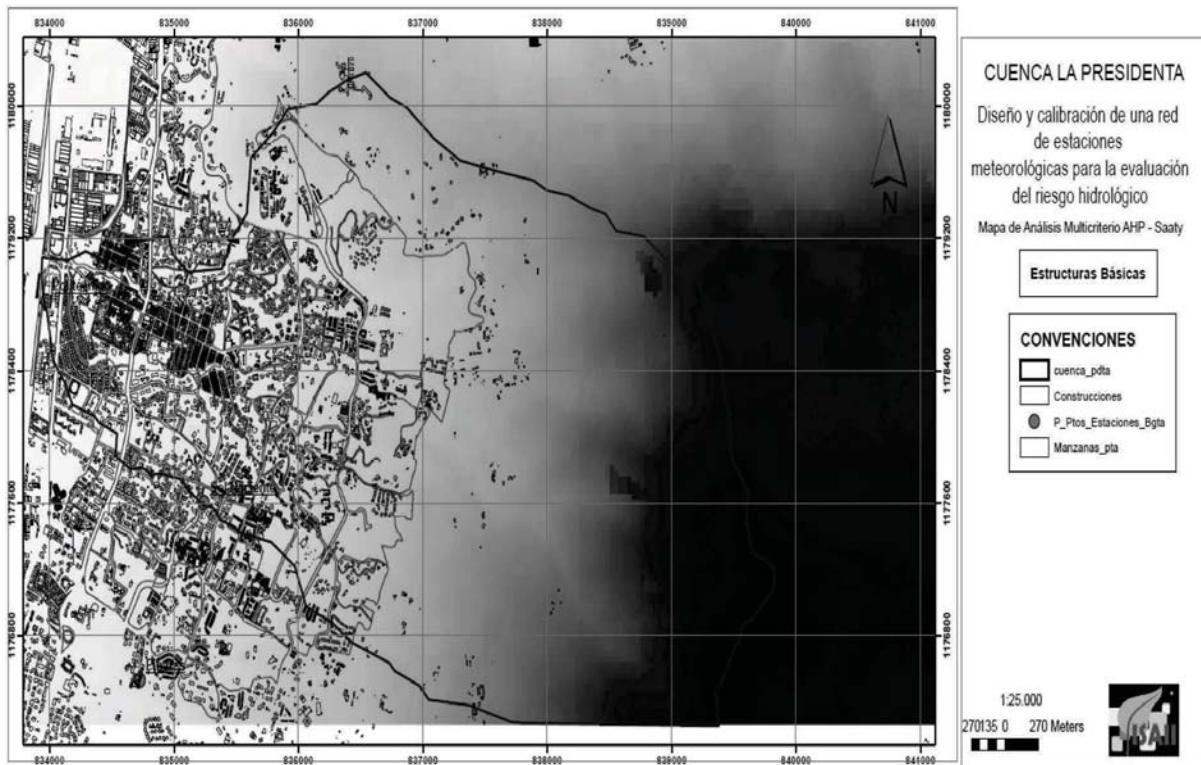


Figura 1. Mapa de capas base para la modelación. Escala 1:25000.

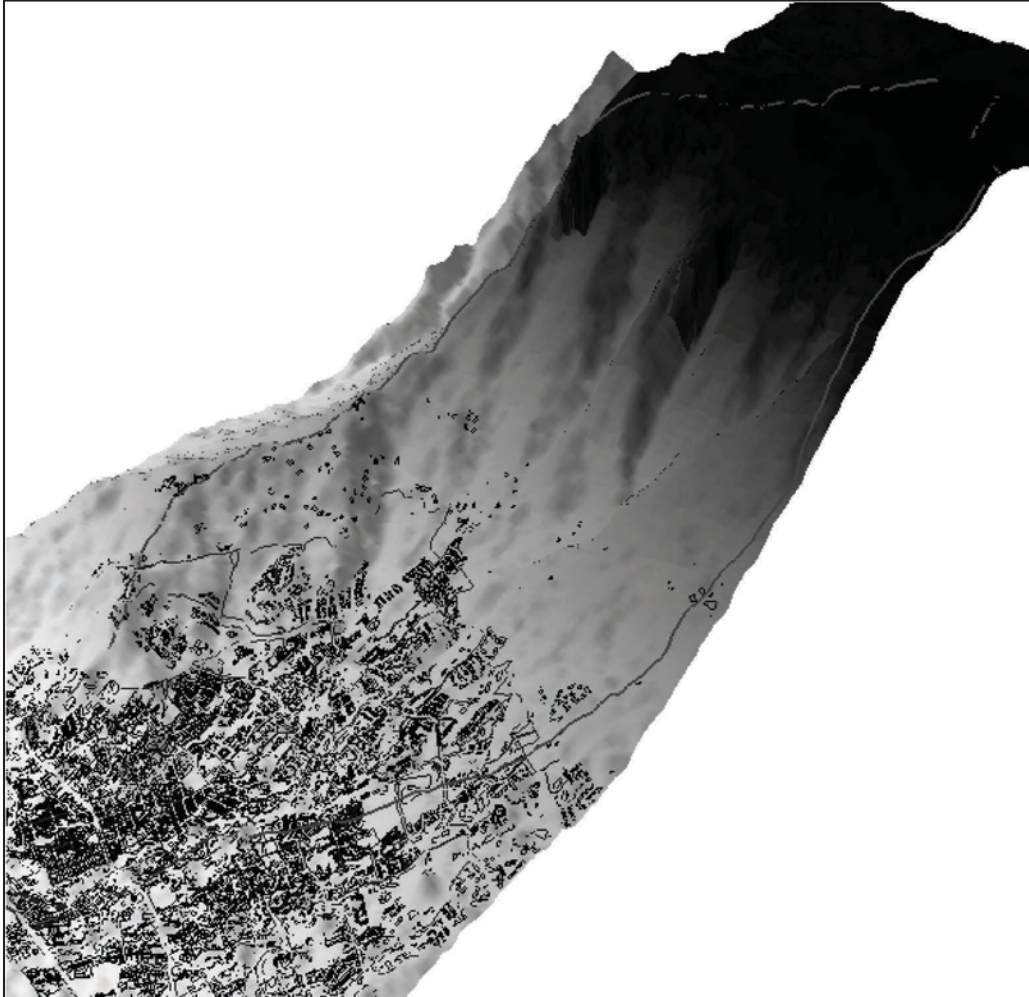


Figura 2. Visualización tridimensional de la cuenca la Presidenta con las capas DEM, Construcciones, Manzanas y vías

2.2 Definición del Modelo

En esta parte del desarrollo del proyecto se empleó el método explícito semi-analítico, que combina los factores de clasificación del método explícito empírico [10], el cual consiste en asignar puntajes ponderados a cada variable para indicar el grado de importancia relativa de cada una de ellas, respecto a las demás.

La suma de los puntajes de todos los factores da como resultado un mapa con valores numéricos que se pueden dividir por intervalos para definir zonas aptas para la ubicación de estaciones meteorológicas en la cuenca de estudio. [8], [10]

Esta técnica combina mapas cualitativos, por lo que es factible emplear la aplicación de las herramientas Geoinformáticas [7]. En este proyecto en particular se utilizó un análisis multivariado, ya

que se cuenta con una cantidad suficiente de información espacial que da cuenta de las variables involucradas, pudiéndose combinar entre sí.

Para calcular el peso o grado de influencia de cada factor interno del terreno, se empleó la fórmula utilizada por Castro [3],

$$r_i = \sum_{j=1}^n (W_j * e_{ij}) \quad (1)$$

- r_i : Prioridad en el terreno para la ubicación de estaciones en la alternativa i.
- w_j : Peso del criterio j.
- e_{ij} : Valor normalizado de la alternativa i en el criterio j.
- n : Número de criterios involucrados en la modelación.

Una vez establecidas las relaciones de peso en los diferentes mapas de susceptibilidad específica, se procede a otorgarles pesos ponderados a cada variable, lo que implica recurrir de nuevo al juicio de expertos.

Todos los datos obtenidos con la aplicación de la fórmula anterior en cada variable se llevan a intervalos, considerando la media y la desviación estándar, manteniendo cinco categorías o grados de susceptibilidad (1: muy baja, 2: baja, 3: media, 4: alta, y 5: muy alta). [8], [10].

La utilización de criterios de expertos incrementa la incertidumbre y subjetividad en la ponderación de variables, por lo cual se recurrió a la utilización del el Proceso Analítico Jerárquico [15], (Analytic Hierarchy Process, AHP) de Thomas L. Saaty, la cual, es una metodología de análisis multicriterio desarrollada a fines de la década del 70 y se transformó en una de las metodologías multicriterio de mayor aplicación práctica [16].

La metodología AHP involucra todos los aspectos del proceso de toma de decisiones: modela el problema a través de una estructura jerárquica, la cual, utiliza una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, y de este modo combina multiplicidad de escalas correspondientes a los diferentes criterios, sintetizando los juicios emitidos y entregando un ranking u ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos (prioridades) [4], [15], [16].

Esta metodología propone una manera de ordenar el pensamiento analítico, de la cual destacan tres principios básicos:

- El principio de la construcción de jerarquías.
- El principio del establecimiento de prioridades.
- El principio de la consistencia lógica [15].

En la tabla 1 se definen y explican los elementos que forman la escala recomendada para las comparaciones por pares entre los elementos de los niveles de la jerarquía.

Los valores en ella contenidos se representan en una escala absoluta, con los que se puede operar perfectamente y en todo caso cabe señalar que el método es independiente de la escala utilizada.

De esta manera el análisis jerárquico de procesos integra aspectos cualitativos y cuantitativos en un proceso único de decisión, en el que, es posible incorporar simultáneamente valores personales y pensamiento lógico en una estructura única de análisis, de modo que convierte el proceso que ocurre naturalmente en la mente del decisor en un proceso explícito, facilitando y promoviendo la toma de decisiones bajo escenarios de multicriterio, y promoviendo resultados más objetivos y confiables. [4], [15], [16]

El análisis multivariado a partir del proceso analítico jerárquico de Saaty, permite minimizar los efectos que sobre la toma de decisiones tiene la subjetividad de los actores que intervienen en los efectos decisorios del problema.

Después de aplicar la metodología AHP de Saaty, a los criterios involucrados en el modelo para la ubicación de estaciones meteorológicas, se obtuvieron las siguientes ponderaciones para las variables relacionadas, obteniendo así cuatro (4) posibles alternativas (Ver Tabla 2) para realizar la simulación.

Tabla 1. Escala fundamental para comparaciones a pares.

INTENSIDAD	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	Igual	Dos actividades contribuyen de igual forma al cumplimiento del objetivo
3	Moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra
7	Muy Fuerte	Una actividad es mucho más favorecida que la otra, su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra, es absoluta y totalmente clara
2,4,6,8	Para transar entre los valores anteriores	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	Si la actividad i se le ha asignado uno de los números distintos de cero mencionados cuando se compara con la actividad j, entonces j tiene el valor recíproco cuando se la compara con i ($a_{ji} = 1/a_{ij}$)	Hipótesis del método

Tabla 2. Organización jerárquica para cuatro opciones de modelación.

	OP 1	OP 2	OP 3	OP 4
CONSTRUCCIONES	1	8	7	5
PENDIENTE	2	7	2	3
AMENAZA DESLIZAMIENTO	3	6	3	4
COBERTURA VEGETAL	4	5	1	2
USOS POTENCIALES DEL SUELO	5	4	5	6
GEOLOGIA	6	3	4	8
DRENAJE	7	2	6	1
VIAS	8	1	8	7

Es importante resaltar que estas cuatro combinaciones son producto de diferentes esquemas de jerarquización de las variables involucradas, permitiendo así, proporcionar diversos escenarios futuros de decisión.

A partir de estas cuatro organizaciones se obtuvieron los siguientes pesos ponderados para las variables utilizando la metodología AHP de Saaty:

Tabla 3. Posibilidades para la ponderación de variables en simulación con SIG.

CONSTRUCCIONES	0,33	OP 1	VIAS	0,26	OP 2
PENDIENTE	0,2		DRENAJE	0,25	
AMENAZA DESLIZAMIENTO	0,14		GEOLOGIA	0,18	
COBERTURA VEGETAL	0,11		USOS POTENCIAL DEL SUELO	0,10	
USOS POTENCIALES DEL SUELO	0,1		COBERTURA VEGETAL	0,07	
GEOLOGIA	0,07		AMENAZA DESLIZAMIENTO	0,07	
DRENAJE	0,04		PENDIENTE	0,04	
VIAS	0,02		CONSTRUCCIONES	0,03	
COBERTURA VEGETAL	0,28	OP 3	DRENAJE	0,32	OP 4
PENDIENTE	0,28		COBERTURA VEGETAL	0,19	
AMENAZA DESLIZAMIENTO	0,12		PENDIENTE	0,18	
GEOLOGIA	0,11		AMENAZA DESLIZAMIENTO	0,09	
USOS POTENCIALES DEL SUELO	0,07		CONSTRUCCIONES	0,08	
DRENAJE	0,06		USOS POTENCIALES DEL SUELO	0,07	
CONSTRUCCIONES	0,05		VIAS	0,04	
VIAS	0,04		GEOLOGIA	0,03	

3. RESULTADOS

3.1 Simulación del modelo y análisis de resultados

Para la simulación del modelo se utilizó la herramienta geoinformática ArcGis en su versión 10.1, como plataforma de software que permitiría,

por medio de la funcionalidad *Model Builder*, propiciar una modelación espacial que arrojaría los cuatro escenarios posibles planteados desde el AHP. Ver figura 3 con modelo.

La herramienta permite poder calificar por medio de reclasificaciones de matrices los datos espaciales que relacionan las variables involucradas, consiguiendo de esta manera una serie de grillas con un mismo nivel de calificación (1: muy baja, 2: baja, 3: media, 4: alta, y 5: muy alta), al igual que un mismo tamaño de celda y sistema de coordenadas, lo cual posibilitará desarrollar un algebra de mapas aplicando la sumatoria de pesos ponderados obtenidos éstos por la metodología AHP. [14]

Los resultados de la simulación pueden ser observados en las siguientes figuras 4, 5, 6 y 7.

De las cuatro simulaciones realizadas, la uno y la dos, arrojan una zonificación muy adecuada para el análisis de disposición de la red de estaciones en la cuenca la Presidenta, pues guardan una coherencia desde la jerarquización de las variables más representativas en ponderación, según el objeto de estudio orientado hacia la gestión del riesgo. [8], [10]

Ahora bien, aunque dentro de los mapas arrojados se ofertan zonas amplias de alta calificación para ubicar estaciones que den cuenta de una coherente ubicación para la toma de datos meteorológicos, las condiciones para la ubicación de las mismas es de alta complejidad.

El poder garantizar accesibilidad en infraestructura, tanto constructiva como de acceso a redes de datos, adicionando la seguridad mínima para el normal desarrollo de las estaciones, invitan a tomar decisiones fundamentales sobre los lugares para su disposición.

Es por ello que se han escogido instituciones educativas, públicas y privadas que posibiliten las garantías antes mencionadas y por consiguiente, este tipo de garantías restringe los sitios para la ubicación, tanto en cantidad, como en negociación institucional para obtener los respectivos permisos o la realización de convenios de cooperación interinstitucional para el uso en dichas instalaciones.

Esta razón fue una de las causas para que los tres sitios iniciales para la ubicación de las estaciones estén ubicados en una misma zona (parte más occidental de la zona de estudio: Politécnico

Colombiano JIC, Colegio Pinares y Guardería Sol Naciente) de la cuenca, sin embargo las condiciones geológicas y climáticas avalan dichos lugares para la toma de datos.

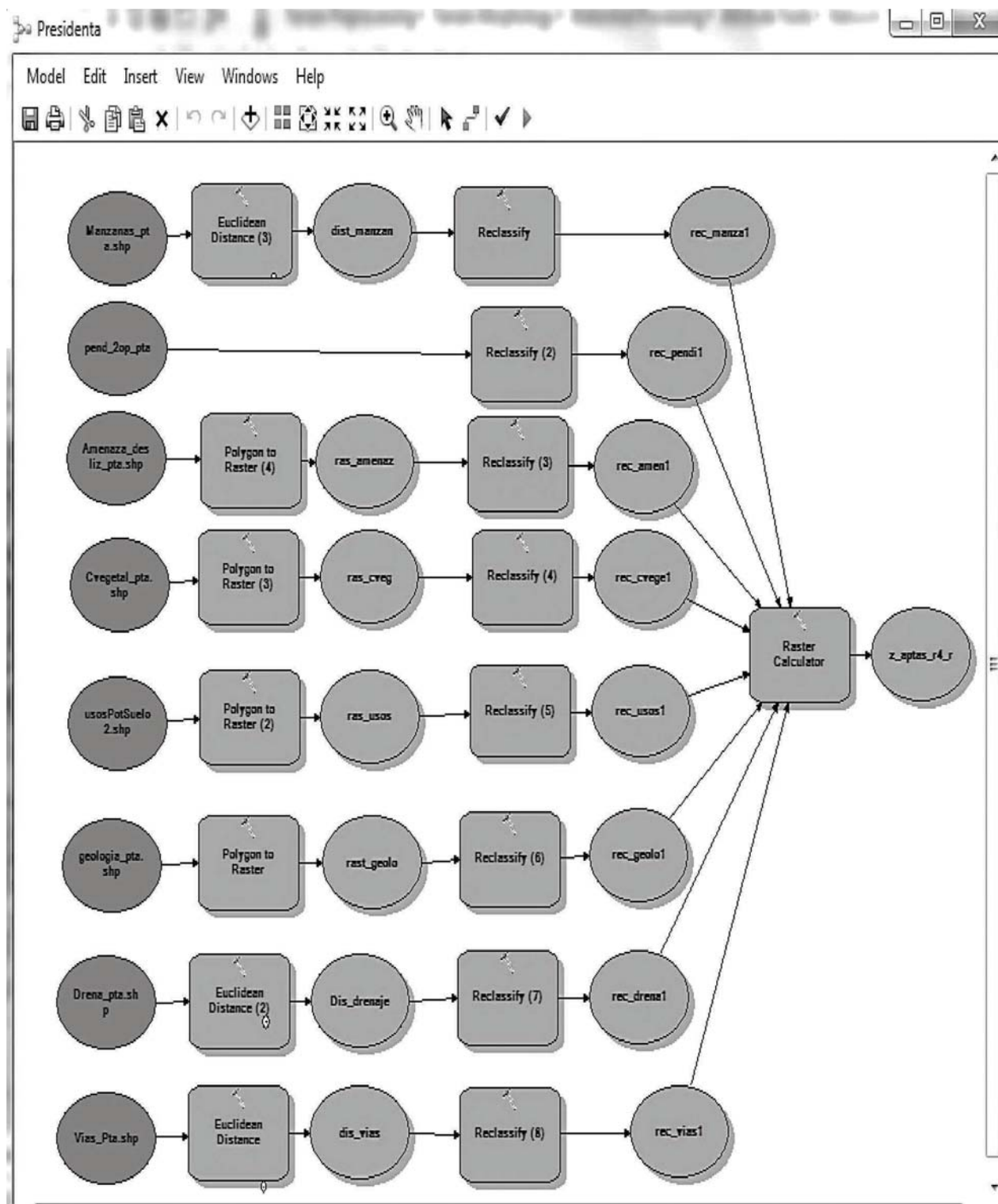


Figura 3. Visualización de la aplicación del modelo por medio de la funcionalidad "Model Builder".

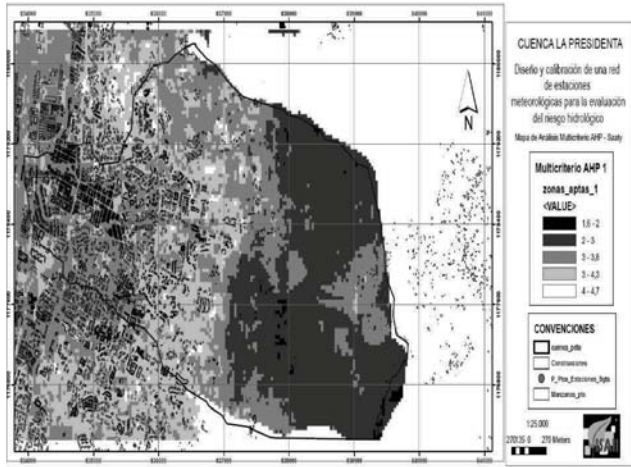


Figura 4. Visualización de mapa con resultados de la simulación en la opción AHP 1.

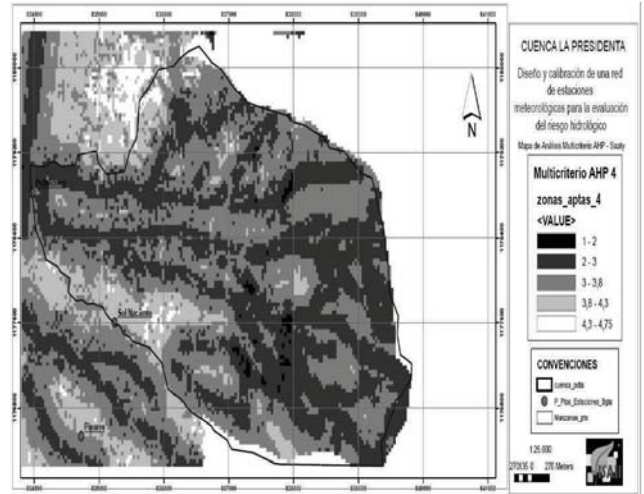


Figura 7. Visualización de mapa con resultados de la simulación en la opción AHP 4.

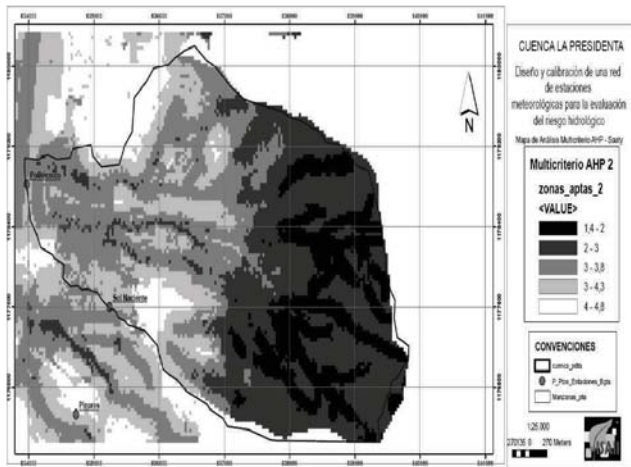


Figura 5. Visualización de mapa con resultados de la simulación en la opción AHP 2.

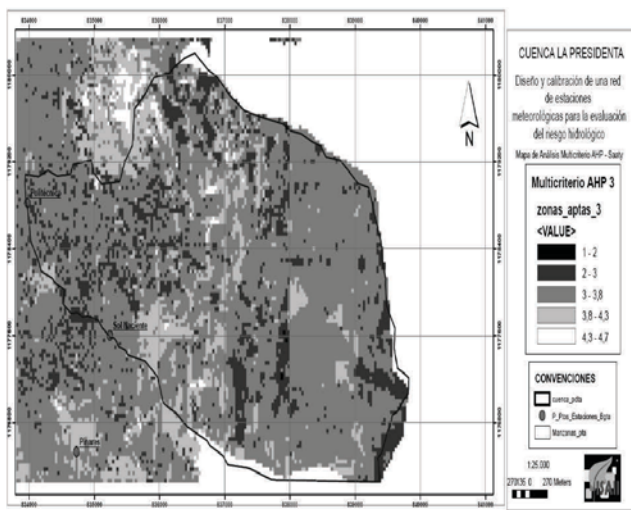


Figura 6. Visualización de mapa con resultados de la simulación en la opción AHP 3

4. CONCLUSIONES

Par esta primera fase del proyecto en donde se pretendía la “confección de los protocolos de diseño, calibración y operación de la red, así como la instalación y puesta en funcionamiento de un grupo de estaciones que trabajan en línea”, se pudo cotejar desde los aspectos de diseño la posibilidad de construcción de un modelo que diera cuenta de la ubicación espacial de la red de estaciones. La calibración y operación de la red, que también fue alcanzada en esta primera fase, son objeto de otro artículo de divulgación científica.

El modelo de pesos ponderados para combinar variables espaciales, acompañado de la metodología AHP de Saaty, permitió obtener coherentes resultados en ponderación de factores, permitiendo proyectar escenarios que den cuenta de alternativas para abordar problemáticas de orden territorial, y en este caso específico la de encontrar zonas para la ubicación de la red de estaciones meteorológicas que cumplieren con los requerimientos de las variables involucradas.

Aunque los resultados arrojados por los modelos y las simulaciones proporcionan diversas zonas para la ubicación de las estaciones, la realidad sobre el proceso de ubicación y los requerimientos administrativos implicados en dicho proceso, limitan en gran medida los lugares aptos para ubicar los dispositivos de captura de datos.

No obstante la adquisición de zonas por medio de simulaciones, que cumplan con los requisitos de ubicación para la estaciones meteorológicas, (tanto en construcciones privadas como públicas), sus diversas características físicas y de barreras naturales o constructivas, y el acceso a canales de comunicación vía WEB, complejizan la ubicación de dispositivos.

El procedimiento y modelos utilizados resultan válidos para futuras fases del proyecto en donde se pueden determinar ubicaciones de dispositivos que permitan medir infiltración de aguas y caudales en drenajes, posibilitando de esta manera aumentar las variables para evaluar, en un futuro cercano, el riesgo hidrológico en la zona de estudio.

5. RECONOCIMIENTOS

El grupo de investigación ISAI agradece la ayuda para la ejecución de este proyecto al Colegio Gimnasio Los Pinares y al Jardín Infantil Sol Naciente.

El grupo valora los aportes del Ingeniero José León Henao, perteneciente también al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Igualmente, agradece al Sistema De Alerta Temprana De Medellín (SIATA) y a la Secretaría De Medio Ambiente de la Alcaldía de Medellín.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AMVA. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo. Junio de 2009.

[2] Cardona A., Omar Darío. La Gestión Local del Riesgo en una Ciudad Andina: Manizales, un Caso Ilustrativo, Integral y Evaluado. ISBN 978-612-4054-05-1. 2009

[3] Castro E, Valencia A, Ojeda J, Muñoz F, Fonseca S (2001) Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa: Guía metodológica. INGEOMINAS / Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca / Escuela Colombiana de Ingeniería. Santa Fé de Bogotá, Colombia. 166 pp.

[4] Chen, Y.Ch., Yeh H.Ch and Wei, Ch. Rainfall Networks design using Kriging and Entropy. *Advances in Hydroscience and Engineering*, Vol VI, 1-9 2004.

[5] Corantioquia; Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Metodología Para la Formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas (PIOM). Convenio 053. 2001

[6] Franco P, Carlos. Desarrollo de un Modelo Basado en Análisis Espacial Multicriterio para la Determinación de Unidades de Ordenación Forestal. Caso Departamento del Casanare. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Geomática. Bogotá D.C., Colombia 2011

[7] Marcano M., Cartaya. R. Análisis de la distribución espacial de la susceptibilidad a los movimientos de remoción en masa, empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG), en la cuenca del río San Julián, estado Vargas, Venezuela. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. *Revista de Investigación* N° 75 Vol. 36. Enero – Abril 2012

[8] Mena Frau, Gajardo Valenzuela, Ormazábal Rojas, Modelación espacial mediante geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial. *Revista Facultad de Ingeniería*. Universidad Tarapacá. Volumen 14 No. 1. 2006

[9] Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. L. Asensio Rodríguez, J. J. "Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio", *GeoFocus*, n° 7, p. 120- 147. ISSN: 1578-5157. 2007

[10] Moreno J., Aguarón J., Cano S., Escobar U. Robustez y Estabilidad en Decisión Multicriterio. Análisis de Sensibilidad en el Proceso Analítico Jerárquico. *Revista Académica de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, España. Vol. 92, N.o 4, 1998.

[11] Parra T., Juan Camilo. Memoria de Estancia de Investigación en el Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá asociada al Proyecto Gestión Sostenible de Abastecimientos (GESTAM) REN 2002-03196. Ministerio de Educación y Ciencia de España. 2007

[12] Pérez J.D. Caracterización Preliminar de la Circulación en la Capa Límite Atmosférica. Caso de Estudio Valle de Aburrá. Tesis de Maestría. Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2008.

[13] Poveda, G. La hidroclimatología de Colombia. Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diaria. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Número 107, Junio de 2004

[14] Rodriguez-Iturbe, I. and Mejia, J.M. The design of rainfall networks in time and space. Water Resources Research. 23(1), 181-190. 1974.

[15] Saaty, T. Fundamentals of decision making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. RWS Publications. Universidad de Pittsburgh, U. S. A. 2000.

[16] Saaty, T.L. 1977. Scaling method for priorities in Hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, 15, 234-28.

[17] SIATA: Sistema de Alerta Temprana de Medellín. www.siata.gov.co. [Consultado el día 25 de Febrero de 2011]

[18] Suarez, Jaime. Deslizamientos: Análisis Geotécnico. ISBN 9789588504032. 2009

[19] U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Risk. May 1988.

[20] Veerle Vanacker, Michiel Vanderschaeghe, Gerard Govers, Edith Willems, Jean Poesen, Jozef Deckers, Bert De Bievred. Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. Geomorphology 52 (2003) 299–315. 2003