

Prospección de aguas subterráneas mediante lógica difusa en Luanda, Angola

Moisés Catanha
Carlos Sacasas-León
José Pérez-Lazo

Resumen

El presente estudio estuvo dirigido a obtener, a partir de la lógica difusa, el mapeo de áreas favorables para la prospección de aguas subterráneas en la provincia de Luanda (Angola). Mediante la integración de seis variables (conductancia longitudinal, delta H, modelo digital de elevación, mapa geológico, cota de nivel estático y resistividad aparente) y utilizando la extensión ArcSDM, del Sig ArcView, con el operador gamma (índice $\gamma=0,7$) se confeccionó el mapa de favorabilidad, mediante el cual se parceló la provincia en tres zonas: poco favorable, favorable y muy favorable para la prospección de acuíferos subterráneos.

Palabras clave: lógica difusa; prospección de agua; aguas subterráneas; mapeo hidrológico.

Groundwater prospecting in Lwanda (Angola) with the application of fuzzy logics

Abstract

This study is aimed at obtaining a map for groundwater prospecting in the province of Lwanda (Angola) applying fuzzy logic. A favorability map was generated by integrating six variables (longitudinal conductance, delta H, digital elevation model, geological map, static elevation and apparent resistivity and using ArcSDM extension of Sig ArcView with gamma operator and index $Y=0,7$. This map made it possible to classify the province into three areas: less favorable, favorable and very favorable for prospecting for underground aquifers.

Keywords: fuzzy logic; groundwater prospecting; hydrological mapping.

1. INTRODUCCIÓN

La lógica difusa, como herramienta matemática, permite tratar y procesar información en la cual se manejan términos inexactos, imprecisos o subjetivos. El presente trabajo está dirigido a obtener, a partir de la lógica difusa, un mapa de zonas favorables para la prospección de agua subterránea en la provincia de Luanda (República de Angola), la cual abarca una parcela territorial de 2 088 km² (Figura 1).

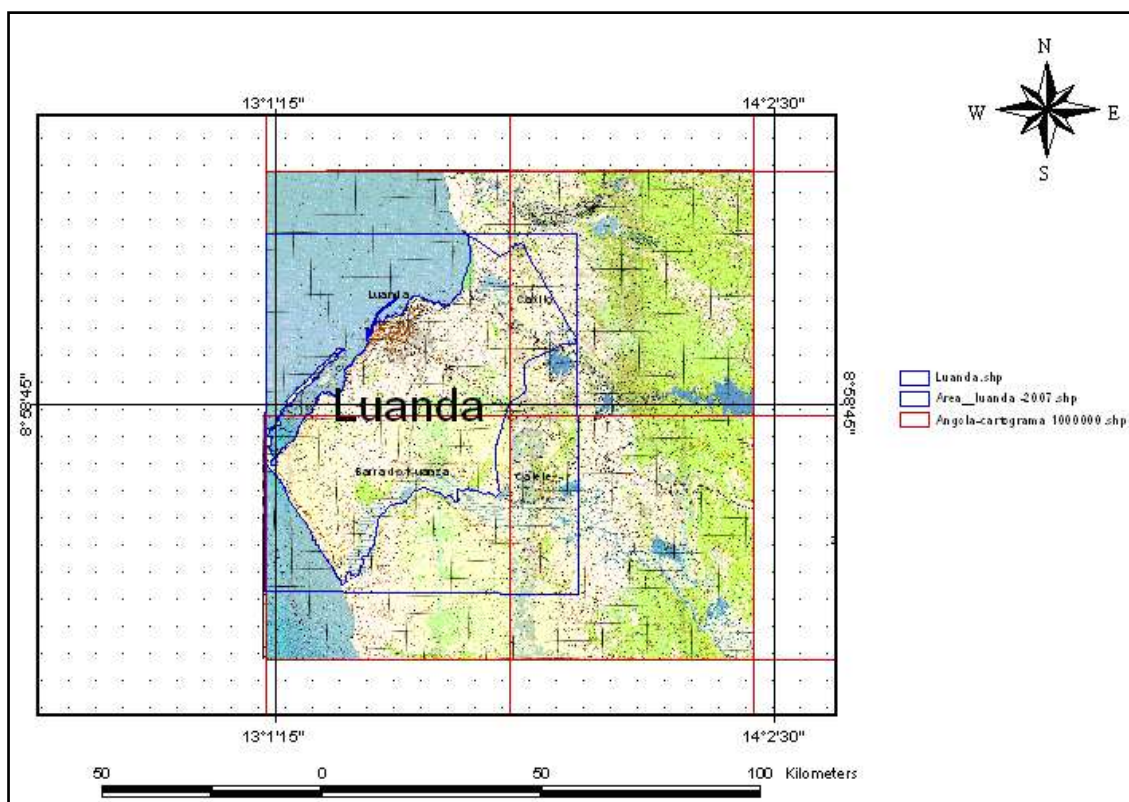


Figura 1. Localización geográfica de la provincia de Luanda.

No se localizaron referencias relacionadas con la prospección de aguas subterráneas aplicando lógica difusa en la República de Angola; sin embargo, a nivel internacional existen algunos trabajos como el de Rather & Andrabi (2012), quienes desarrollan una metodología basada en la lógica difusa para el mapeo de áreas potenciales para agua subterránea. Por otra parte, en Irán Monjezi y otros investigadores (2013) realizan un trabajo sobre la selección de locales apropiados para la recarga artificial de agua subterránea en regiones áridas y semiáridas. Kumar, Kumar & Mallick (2013) la emplean con el objetivo de mapear áreas potenciales de agua subterránea usando mapas temáticos de geología, drenaje, entre otros, a través de imágenes satelitales.

Otros autores (D'ércole, Groves & Knox-Robinson 2000; Shahid, Nath & Maksud-Kamal 2002; Manap *et al.* 2013, 2014; Rahmati *et al.* 2015) han

desarrollado trabajos similares en los que se aplican estos conceptos, de forma eficiente, para la prospección de aguas subterráneas.

El presente estudio estuvo dirigido a mapear, haciendo uso de la lógica difusa, las áreas favorables para la prospección de aguas subterráneas en la provincia de Luanda (Angola).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La Tabla 1 expone los datos de partida de las variables utilizadas para la confección del mapa de probabilidad de ocurrencia del agua subterránea en la provincia de Luanda.

Tabla 1. Variables utilizadas en el estudio

No	Ra (Ω .m)	MDE	Caudal (m ³ /s)	CNE (m)	Delta H (m)	S	Mapa geológico
1	89,03	86,0	7 871,07	18,12	7,1	20 087,86	Quelo
2	112,09	81,0	9 909,5	8,9	5,2	16 863,20	Quelo
3	106,6	84,0	9 997,0	8,0	4,9	16 321,63	Quelo
4	52,8	65,0	11 080,8	5,0	12,3	4 504,39	Quelo
5	49,4	66,0	11 287,6	4,8	13,2	4 104,58	Quelo
6	38,55	65,0	11 877,5	4,6	14,3	3 820,73	Quelo
7	26,7	48,0	11 212,8	4,3	12,0	4 017,92	Quelo-Luanda Cacuaco
8	16,18	57,0	9 975,4	4,6	8,6		Luanda Cacuaco
9	116,0	108,0	8 595,0	23,0	8,2	24 107,93	Quelo
10	127,5	101,0	8 390,5	19,7	8,4	19 677,72	Quelo
11	63,26	66,0	9 065,4	36,5	2,3	143 863,96	Quelo-Luanda Cacuaco
12	61,9	78,0	16 825,8	37,0	21,8	28 557,55	Quelo
13	61,9	77,0	12 060,7	39,9	3,5		Quelo
14	51,0	81,0	1 543,9	63,6	4,0	24 548,01	Quelo
15	44,5	60,0	3 545,8	5,2	11,9	1 549,43	Quelo
16	42,9	72,0	4 235,0	5,8	2,2	11 165,00	Quelo
17	42,6	64,0	4 102,6	4,8	1,2	16 410,40	Quelo
18	38,9	74,0	5 001,0	70,0	13,6		Quelo
19	38,9	75,0	5 044,5	64,0	13,9		Quelo
20	34,0	62,0	6 378,0	5,9	8,6		Quelo
21	29,2	38,0	7 196,7	7,3	8,3	6 329,63	Quelo
22	14,2	63,0	8 239,1	7,6	7,2	8 696,83	Quelo
23	16,18	57,0	8 241,7	6,8	7,0	8 006,22	Quelo-Luanda Cacuaco
24	18,5	67,0	9 746,0	17,5	6,8	25 081,62	Quelo-Luanda Cacuaco
25	17,7	69,0	8 996,7	14,9	4,0	33 512,71	Quelo
26	16,5	51,0	8 796,9	-11,4	7,8		Luanda Cacuaco

27	18,3	30,0	8 560,0	1,4	6,8	1 762,35	Luanda Cacuaco
28	11,2	63,0	8 846,0	1,3	6,8		Quelo-Luanda Cacuaco
29	23,3	63,0	8 857,5	1,2	6,3		Luanda Cacuaco
30	4,75	46,0	8 794,0	1,3	6,6		Quelo-Luanda Cacuaco
31	23,3	65,0	10 149,9	3,2	5,2		Quelo
32	7,31	45,0	8 190,9	2,4	-2,4		Luanda Cacuaco
33	25,3	18,0	8 148,9	1,9	2,9		Luanda Cacuaco
34	26,9	19,0	8 365,0	2,0	2,6		Luanda Cacuaco
35	43,2	57,0	6 240,6	1,9	0,5		Luanda Cacuaco
36	35,2	55,0	9 032,0	1,3	4,3		Luanda Cacuaco
37	38,9	68,0	8 758,0	3,3	3,6		Quelo-Luanda Cacuaco
38	25,9	68,0	10 149,9	3,2	5,2		Quelo
39	50,2	86,0	9 883,0	9,6	4,5		Quelo
40	58,4	97,0	10 935,0	1,9	3,6		Quelo
41	55,9	96,0	10 826,6	11,8	4,6		Quelo
42	33,1	52,0	6 881,5	2,0	3,7	3 719,73	Luanda Cacuaco
43	38,02	55,0	6 199,6	2,0	4,9	2 530,45	Quelo
44	26,8	56,0	5 092,0	2,0	5,9		Quelo
45	39,7	14,0	8 411,6	2,0	2,0		Luanda Cacuaco
46	59,6	34,0	8 649,3	2,0	5,9	2 931,97	Luanda Cacuaco
47	63,2	45,0	8 098,3	3,0	2,0	12 147,45	Luanda Cacuaco
48	60,3	55,0	12 890,9	9,0	0,8		Luanda Cacuaco
49	60,3	59,0	13 327,0	9,1	0,7		Luanda Cacuaco
50	61,8	92,0	9 180,0	9,8	3,1		Quelo-Luanda Cacuaco
51	71,3	90,0	8 801,8	3,2	4,0		Quelo
52	90,3	109,0	17 932,3	12,9	5,6		Quelo
53	111,17	86,0	13 251,4	9,7	6,9		Quelo
54	91,6	74,0	10 084,0	11,7	5,1	23 133,88	Quelo
55	78,0	71,0	3 805,8	11,9	3,7	12 240,28	Quelo
56	102,4	111,0	17 882,0	11,0	7,3	26 945,48	Quelo
57	103,8	106,0	17 933,0	11,9	7,7	27 714,64	Quelo
58	120,5	112,0	6 009,5	5,1	0,3		Quelo-Luanda Cacuaco
59	126,4	109,0	5 981,9	5,0	1,7		Luanda Cacuaco
60	115,6	113,0	5 959,0	4,5	0,8		Quelo
61	119,4	118,0	3 350,0	6,9	8,3		Quelo-Luanda Cacuaco
62	92,4	114,0	8 998,0	5,0	8,9		Quelo
63	92,7	65,0	5 765,0	9,2	4,5		Luanda Cacuaco

S: conductancia longitudinal; **delta H**: diferencia entre la profundidad del nivel dinámico y la profundidad del nivel estático; **MDE**: modelo digital de elevación; **MG**: mapa geológico; **CNE**: cota del nivel estático; **Ra**: resistividad aparente.

2.1. Metodología

Kemp y demás colaboradores (2001) proponen utilizar, para la confección de los modelos difusos, las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con las variables que mejor correlacionan con la favorabilidad de áreas para la prospección del agua subterránea. Ellos desarrollaron una extensión para el sistema *ArcView* nombrada *ArcSpatial Data Modeller (ArcSDM)*, la cual fue diseñada para aplicar técnicas de análisis modernas, como pueden ser las redes neuronales, el peso de la evidencia, la regresión logística y la lógica difusa.

El programa fue perfilado para la prospección de minerales, pero los autores recomiendan también otros usos. En este caso, se adaptan las bondades de la extensión de *ArcView* para utilizar esencialmente la lógica difusa en la confección de mapas de favorabilidad para la prospección de aguas subterráneas. Como parte de la metodología se propone seguir los siguientes pasos para la utilización de la extensión *ArcSDM* en este estudio:

- Crear los mapas raster de cada una de las variables que definirán el modelo.
- Reclassificar los mapas raster de las variables para darle un valor entero a cada intervalo (exigencia de la extensión *ArcSDM*).
- Otorgar a cada intervalo una función de pertenencia, en dependencia del criterio de experto asumido.
- Probar las diferentes combinaciones difusas (and, or, producto, suma y gamma) entre las variables (Fernández-Núñez 2006).

El conjunto difuso que se emplea es "*determinación de zonas de favorabilidad para la prospección del agua subterránea*" y representa, en términos lingüísticos, la incidencia que puede tener una variable geológico-geofísica, de manera directa o indirecta, en una zona específica de favorabilidad, por lo que grados de pertenencia con valor uno (1) representarán los valores de los atributos que más condiciones de favorabilidad poseen para la ocurrencia de agua subterránea y con valor cero (0) los que menos condiciones poseen (Zadeh 1965).

A partir de una plantilla de Microsoft Excel se transformaron los datos en formato *dbf* para ser manipulados en ambiente *Sig ArcView* (ESRI 2002). Con la extensión *Surface* de *ArcView* se hizo la conversión de las variables

en imágenes ráster (matrices). Posteriormente, se reclasificaron los mapas ráster para darle un valor entero a cada intervalo.

Como a priori no se sabe la importancia que cada variable puede tener en relación a la surgencia del agua subterránea en la región de estudio se hizo un análisis estadístico, utilizando el software *Statistica* 12 (2016), que permitió establecer el orden de importancia para cada variable.

Se escogió el caudal como variable dependiente (Tabla 1). Los resultados de la regresión múltiple permitieron definir el orden de importancia de las variables, ubicando como la de mejor relación con el agua subterránea a la conductancia longitudinal (S). Las demás variables le siguen en este orden: delta H, MDE, CNE y Ra.

Tabla 2. Resultado de cálculo de regresión múltiple

Variable	Caudal						
	Beta	Corr. parcial	Corr. Semiparcial	Tolerancia	R-cuad.	T(47)	Nivel p
Ra	-0,051319	-0,035602	-0,032788	0,408214	0,591786	-0,24423	0,808115
MDE	0,193045	0,131541	0,122129	0,400236	0,599764	0,90970	0,367621
CNE	-0,114009	-0,079539	-0,073439	0,414928	0,585072	-0,54702	0,586950
Delta H	0,741765	0,233927	0,221446	0,089126	0,910874	1,64949	0,105716
S	-0,943991	-0,285663	-0,274350	0,084465	0,915535	-2,04356	0,046625

Una vez sabido el orden en que cada variable influye para determinar la existencia del agua subterránea en la región de estudio se establecieron los grados de pertenencia para cada variable, como su contribución al surgimiento del agua subterránea en la región. Como criterio de experto se asume que la conductancia longitudinal, como la variable que más contribuye a la surgencia del agua subterránea, tiene una función de pertenencia igual a 0,9.

Para las otras variables sus valores de pertenencia se calculan usando la siguiente regla:

$$Y/0,9=Y1/X$$

Donde:

Y=0,285663: valor de la variable, en regresión múltiple, que mejor expresa su relación con la surgencia del caudal;

0,9: valor de la función de pertenencia atribuida a la variable Y;

Y1: valor de la variable que se pretende atribuir al nuevo valor de función de pertenencia;

X: función de pertenencia que se busca;

$Y/0,9=$ es una constante.

Así en la Tabla 3 se tienen las funciones de pertenencia para cada variable como su contribución a la búsqueda del agua subterránea.

Tabla 3. Funciones de pertenencia de las variables

Variable	S	Delta H	MDE	MG	CNE	Ra
Función de pertenencia	0,9	0,7	0,4	0,4	0,2	0,1

Las funciones de pertenencia se distribuyeron en los intervalos asumidos para cada variable, lo cual quiere decir que estos valores son los máximos que puede asumir una variable. Conforme concibió la extensión *ArcSDM* cada variable está dividida en nueve intervalos, por lo se tiene que dividir el valor de función de pertenencia de cada variable por el número de intervalos.

Por ejemplo: Para la conductancia longitudinal se tiene $0,9:9=0,1$, valor mínimo que toma el intervalo que menos contribuye dentro de esta variable, en ese caso el intervalo (0-1,213) de la Tabla 4. Después se suma siempre 0,1 a los subsiguientes intervalos.

Tabla 4. Orden de favorabilidad para la conductancia longitudinal)S=

Intervalo	Conteo	Valor de pertenencia
1 (0 - 1,213)	155 399	0,1
2 (1,213 - 2,427)	66 726	0,2
3 (2,427 - 3,64)	26 707	0,3
4 (3,64 - 4,853)	16 135	0,4
5 (4,853 - 6,067)	7 162	0,5
6 (6,067 - 7,28)	3 731	0,6
7 (7,28 - 8,493)	2 179	0,7
8 (8,493 - 9,706)	1 061	0,8
9 (9,706 - 10,92)	5	0,9

El valor de favorabilidad atribuido a S es 0,9 debido a que a mayor conductancia longitudinal, mayor es la probabilidad de encontrar el agua subterránea para un determinado espesor acuífero. El mismo razonamiento se siguió para las otras variables.

Tabla 5. Orden de favorabilidad para delta H

Intervalo	Conteo	Valor de pertenencia
1 (-2,499 - 0,206)	1 485	0,63
2 (0,206 - 2,912)	13 602	0,56
3 (2,912 - 5,617)	115 869	0,49
4 (5,617 - 8,322)	54 383	0,42
5 (8,322 - 11,027)	91 991	0,35
6 (11,027 - 13,732)	1 557	0,28
7 (13,732 - 16,437)	159	0,21
8 (16,437 - 19,143)	33	0,14
9 (19,143 - 21,848)	26	0,07

El valor de la función de pertenencia de la variable delta H es de 0,7. Los valores de pertinencia de esta variable disminuyen según se desciende en el intervalo, lo que justifica que se le otorgue mayor importancia a los valores menores de la diferencia, porque cuanto menor es esta última, mayor es la probabilidad de existencia de agua.

La geomorfología de Luanda está conformada por relieves planos y monótonos, que forman terrazas. A estas terrazas le fueron atribuidos valores para la variable MDE, de acuerdo con la opinión de expertos (Tabla 6).

La primera terraza (de 4to orden) constituye el relieve más bajo, con cotas que van de 0 m hasta 20 m. Están esencialmente constituidas por depósitos de playa del Pleistoceno Superior.

La segunda terraza (de 3er orden) posee cotas comprendidas entre 21 m y 40 m; se trata de un relieve policíclico, resultante de la remodelación en condiciones subaéreas de la superficie de primer orden. Se le atribuye edad pleistocénica media. Esta región tiene un valor mayor, en esta escala, porque es donde existen geomorfológicamente las pequeñas cuencas que pueden acumular mayor cantidad de agua.

La tercera terraza (de 2do orden) formada por superficies con cotas comprendidas entre 40 m y 80 m.

La cuarta terraza es la superficie más alta y más extensa, con cotas que van desde los 80 m a los 208 m sobre el NMM. Esta superficie es resultante de la erosión subaérea que talla las formaciones terciarias (miocénico-pleiocénicas), cuya fase final de aplicación es atribuida al Pleistoceno Inferior. Está cubierta por depósitos sedimentarios del Cuaternario (arenas grises y

rojas) (Miguel 2001-2002). El valor atribuido se debe a que las arenas grises y rojas que cubren toda la superficie tienen alto valor de transmisividad hidráulica del agua pluvial que puede llegar hasta los niveles más bajos del suelo, recargando así los posibles acuíferos existentes en la zona (Tabla 6).

Tabla 6. Orden de favorabilidad para el MDE

No.	1	2	3	4
Terrazas (m)	0-20=0	21-40=20	41-80=40	81-208=80
Valor de pertenencia	0,1	0,2	0,3	0,4

Según resultados de la regresión múltiple (Tabla 2) el MDE es la tercera variable de mayor peso. Le fue atribuido el valor de 0,4 ya que es posible determinar las terrazas existentes en la región de estudio y establecer los locales de posibles cuencas favorables para localizar agua subterránea.

Al mapa geológico se atribuyó el valor de 0,4. Para esta variable no fue posible establecer orden de pesos por estadística, debido al tipo de dato no numérico que lo compone, pero desde el punto de vista del criterio de expertos, se le asigna igual importancia que al MDE.

La variable mapa geológico (MG) es una red que tiene ocho intervalos (Tabla 7), resultantes de la subdivisión del intervalo [0;1], tomando como límites inferior cinco centésimas (0,05) y límite superior de cuatro décimas (0,4). La selección de estos valores obedece a criterios de expertos en función del comportamiento de cada formación, respecto a su potencial de aguas subterráneas. A continuación se describen las formaciones.

Tabla 7. Orden de favorabilidad del mapa geológico

Intervalos	Conteo	S_value	Formaciones geológicas	Valor de pertenencia
1	245	Bj	Bom Jesus	0,2
2	2 880	AL	Aluviales	0,4
3	574	Cu	Cunga	0,05
4	115	Fu	Funda	0,05
5	228	Gr	Gratidao	0,05
6	2 830	LC	Luanda Cacuaco	0,3
7	11 035	Sr	Quelo	0,4
8	1 657	Qu	Quifangondo	0,05

A la variable CNE fue atribuido el valor de 0,2, el tercero en la escala de pesos de la regresión múltiple. Este valor corresponde al hecho de que ella da una idea de la cantidad de agua existente en un pozo. La Tabla 8 muestra que el valor de pertinencia aumenta según el de la cota, presuponiéndose que cuanto mayor es esta última, mayor es la probabilidad de existencia de agua subterránea.

Tabla 8. Orden de favorabilidad de la CNE

Intervalos	Conteo	Valor de pertinencia
1 (-11,408 - 5,429)	4 592	0,02
2 (5,429 - 22,266)	13 506	0,04
3 (22,266 - 39,103)	8 023	0,06
4 (39,103 - 55,94)	5 057	0,08
5 (55,94 - 72,777)	935	0,10
6 (72,777 - 89,614)	523	0,12
7 (89,614 - 106,451)	301	0,14
8 (106,451 - 123,288)	196	0,16
9 (123,288 - 140,125)	139	0,18

A la variable Ra se le atribuyó el valor de 0,1 en la Tabla 2. Este valor fue atribuido por el hecho de que la resistividad varía con el tipo del agua; para aguas saladas y salobres presenta valores bajos, en tanto el agua dulce presenta valores relativamente altos en relación a las otras aguas. Es un medio para diferenciar los tipos de aguas existentes en el subsuelo. Para la variable fueron seleccionados nueve campos de acuerdo con la variación de la misma (Tabla 9).

Tabla 9. Orden de favorabilidad de resistividad aparente

Intervalos	Conteo	Ra	Valores de pertinencia
1	1 149	1,542 - 27,77	0,01
2	1 801	27,77 - 53,999	0,02
3	3 903	53,999 - 80,228	0,03
4	7 611	80,228 - 106,457	0,04
5	2 906	106,457 - 132,686	0,05
6	1 323	132,686 - 158,914	0,06
7	411	158,914 - 185,143	0,07
8	165	185,143 - 211,372	0,08
9	72	211,372 - 237,601	0,09

El valor mínimo atribuido al primer campo fue 0,01. Para saber cuáles son los valores que se tenía que atribuir se dividió 0,1 (que es el valor atribuido, de acuerdo a la tabla de pesos de regresión múltiple) entre nueve (9) que es el número de campos de la variable. El valor obtenido se fue sumando sucesivamente a los otros intervalos. La importancia de las resistividades tiene orden creciente en la Tabla 9. Por ejemplo, el intervalo número 1 corresponde a resistividades más bajas y el intervalo número 9 corresponde a las resistividades más altas. Después de distribuirse los valores de pertenencia a los intervalos se realizó la entrada de los datos al software.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el comportamiento de la variable S en cuanto a la surgencia de agua subterránea. Los valores de S guardan una relación de proporcionalidad directa con los del caudal.

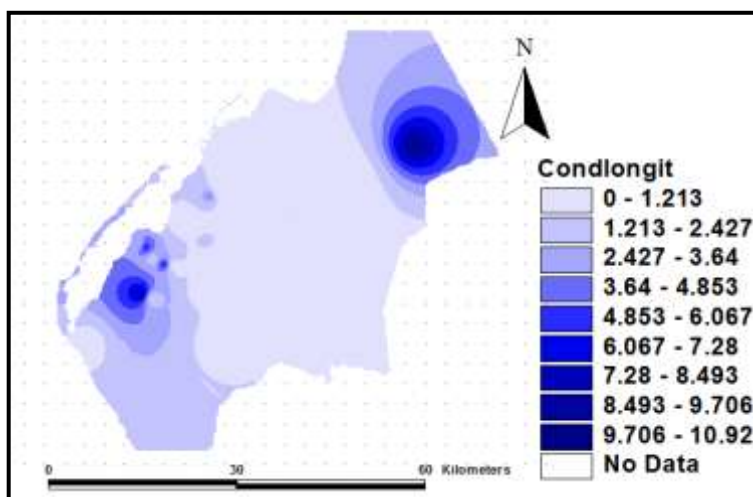


Figura 2. Matriz de la conductancia longitudinal.

La Figura 3 muestra la cantidad de agua que el acuífero puede suministrar. Lo anterior puede ser explicado por el hecho de que un pozo, cuando es bombeado, presenta una disminución del agua del nivel estático hasta alcanzar el nivel dinámico. Si el cono de bombeo es muy profundo indica que hay poca recarga en el acuífero, que la capacidad de reposición del agua del acuífero es muy débil, por tanto, la diferencia entre la profundidad del nivel dinámico y la profundidad del nivel estático es grande y si esa diferencia es pequeña significa que el acuífero es muy productivo. Así, para valores pequeños de delta H el caudal es mayor.

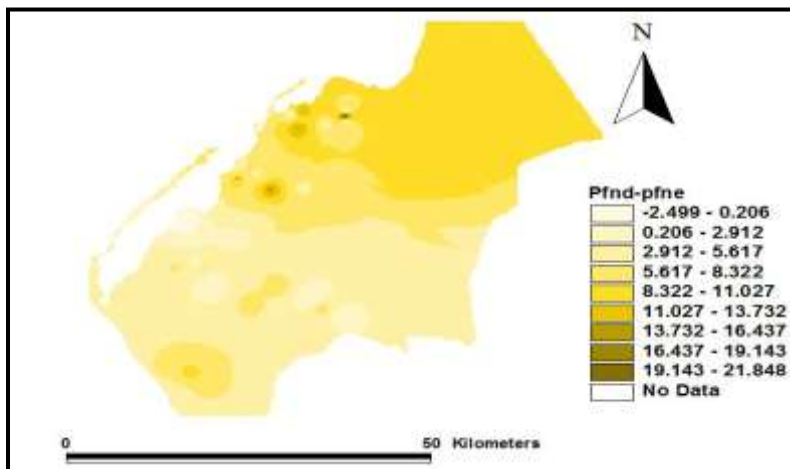


Figura 3. Matriz de delta H.

La Figura 4 muestra la cantidad de agua que puede existir en el pozo, indicando que para mayores valores de la variable representada hay mayor cantidad de agua y viceversa. La CNE es la diferencia entre la cota del suelo y la profundidad del nivel estático del pozo. La cota del suelo es el *datun* para el agua, luego se substrae la profundidad del nivel estático, obteniéndose la CNE.

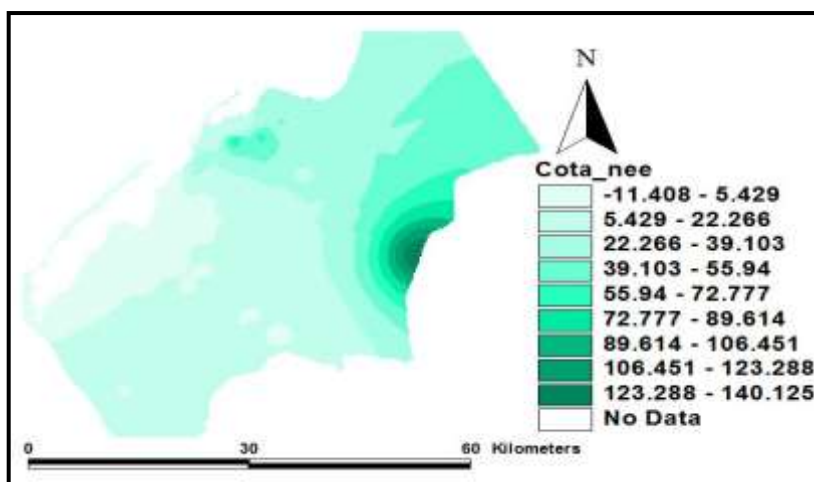


Figura 4. Matriz de la cota del nivel estático.

La matriz del MDE muestra que las terrazas de 1er orden son las más importantes para la prospección del agua subterránea, por eso tienen el peso 0,4, que corresponde a la superficie más alta y más extensa, con cotas que van desde los 80 m a los 208 m sobre el nivel medio del mar y, además, porque las arenas grises y rojas que cubren toda la superficie tienen alto valor de transmisividad hidráulica del agua pluvial que puede llegar hasta las zonas más bajas del suelo, recargando así los posibles acuíferos existentes en la zona (Figura 5).

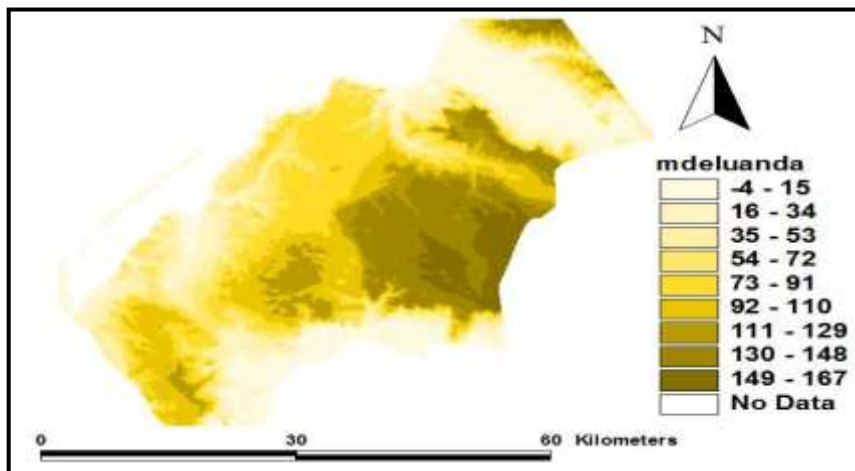


Figura 5. Matriz del modelo digital de elevaciones.

La Fm. Aluviales (AL) está constituida por sedimentos aluviales acumulados de los ríos Bengo y Cuanza y otros ríos intermitentes, constituidos principalmente por arenas. La formación Bom Jesús (BJ) constituye un acuífero debido a que en algunos lugares la roca caliza es la facie más pronunciada. La formación Quelo (Sr), como es conocido, está formada por depósitos de arena fina a tamaño de grano medio. Presentan alta transmisividad hidráulica, permitiendo la filtración para el fondo del subsuelo de las aguas pluviales. La formación Luanda-Cacuaco (LC) es la formación que retiene el agua; constituye el acuífero principal del sistema Quelo-Luanda. Las formaciones Cunga (CU), Funda (Fu), Gratidao (Gr) y Quifangondo (Qu) son, básicamente, formaciones constituidas de arcillas y margas, por lo tanto, forman capas impermeables del sistema acuífero (Figura 6).

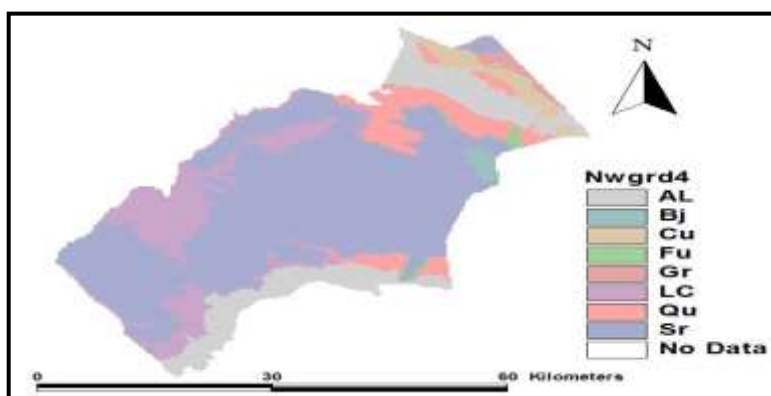


Figura 6. Matriz del mapa geológico del área de estudio.

La resistividad tiene valores menores para agua salada, valores intermedios para el agua salobre y valores relativamente altos para el agua dulce (Figura 7).

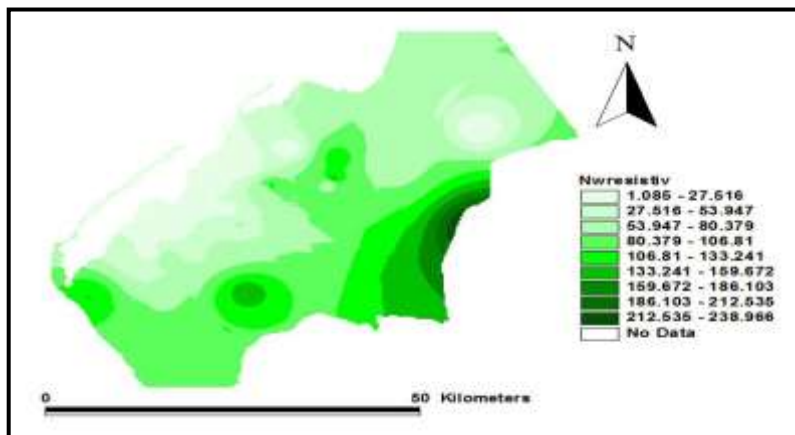


Figura 7. Grid de resistividad de las capas acuíferas.

La integración de todas las matrices en un modelo de lógica difusa dio lugar a la obtención del mapa de favorabilidad. La unidad de decisión lógica realiza operaciones de inferencia para obtener, a partir de la evaluación de los niveles de compatibilidad de las entradas con las condiciones impuestas por la base de reglas, una acción a ser realizada por el sistema (Souza *et al.* 2010).

Según Cox (1994), existe una etapa que es la desfuzzificación, donde los valores *fuzzy* son convertidos en números reales, teniendo así un conjunto de salida matemáticamente definido.

Se calcula la salida con base en la inferencia obtenida en el módulo Unidades de Decisión Lógica, con las funciones de pertinencia de las variables lingüísticas de la parte consecuente de las reglas para obtener una salida no difusa.

En esta etapa las regiones resultantes son convertidas en valores de salida del sistema, los cuales constituyen el modelo procurado, en este caso, el modelo de favorabilidad para la prospección de las aguas subterráneas en el área de estudio, Luanda (Figura 8).

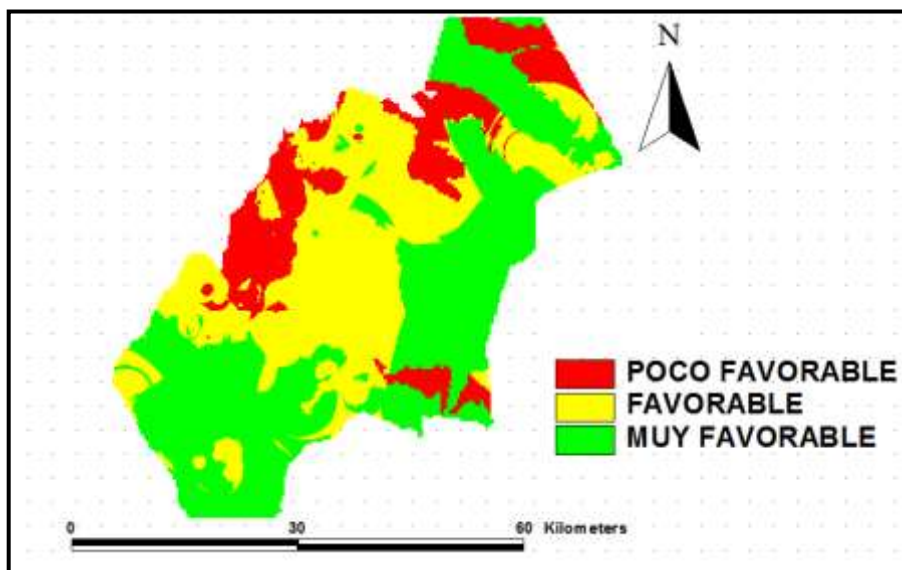


Figura 8. Mapa del modelo de favorabilidad para prospección de aguas subterráneas, Luanda.

La Figura 8 revela que toda la zona cercana a la costa es predominante del agua salada y salobre (color rojo), por lo que los pozos perforados cerca de esta zona tendrán agua salada a salobre, producto de la intrusión salina que los afecta. En la medida que se aleja de la costa, más para el este y sur del área de estudio, el agua va transicionando de salada para salobre y luego se torna más dulce (color verde)

4. CONCLUSIONES

- La metodología basada en técnica difusa permitió determinar zonas de favorabilidad para las condiciones geológicas de la provincia de Luanda, Angola. A partir de la integración de las variables se obtuvo el mapa modelo de favorabilidad de la región; el cual, en virtud de los resultados mostrados, constituye un buen indicador para la cartografía geológica en la prospección de acuíferos subterráneos

5. AGRADECIMIENTOS

A colectivos de profesores y estudiantes del departamento de geofísica de la Universidad Agosto Neto de la República de Angola, por facilitar los materiales, medios disponibles, por su permanente apoyo, intercambio, comprensión y colaboración.

6. REFERENCIAS

Cox, E. 1994: The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems. AP Professional, New York.

- ESRI 2002: ARCVIEW Gis 3. 3. Copyright © Environmental Systems Research Institute, Inc.
- KEMP, L. D.; BONHAM-CARTER, G. F.; RAINES, G. L. & LOONEY, C. G. 2001: ArcSDM: ArcView extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis. Disponible en: http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/default_e.htm.
- KUMAR, U.; KUMAR, B. & MALLICK, N. 2013: Groundwater Prospects Zonation Based on RS and GIS Using Fuzzy Algebra in Khoh River Watershed, Pauri-Garhwal District, Uttarakhand, India. *Global Perspectives on Geography (GPG)* 1(3), August.
- ZADEH, L. A. 1965: Fuzzy Sets. *Information and Control* 8(3): 338-353.
- MAGALHÃNES, A. S.; MORAIS, J. P. & COLOMBO, E. M. M. 2009: Plataforma sig: investigações geoelectricas para a prospecção hidrogeologica na provincia de Luanda. Tesis de diploma. Universidad Agostinho Neto, Angola.
- MIGUEL, G. L. 2001-2002: Sistema Aquífero Quelo, Luanda.
- MONJEZI, N.; RANGZAN, K.; TAGHIZADE, A. & NEYAMADPOUR, A. 2013: Site selection for artificial groundwater recharge using GIS and Fuzzy logic. *International Journal of Engineering & Technology* 1(5): 294-309.
- FERNÁNDEZ-NÚÑEZ, H. M. 2006: Metodología para cartografiar la influencia de factores geoambientales en la distribución espacial de los índices de salud. Tesis doctoral. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- RATHER, J. A. & ANDRABI, Z. 2012: Fuzzy Logic Based GIS Modeling for Identification of Ground Water Potential Zones in the Jhagrabaria Watershed of Allahabad District, Uttar Pradesh, India. *International Journal of Advances in Remote Sensing and GIS* 1(2): 218-233.
- SOUZA, A. P. DE; ZOMER, C.; LOCKS, H. LUIZ FERNÁNDES, M. B.; FERNÁNDES, N. J. 2010: Lógica Difusa. Disponible en: http://www.gsigma.ufsc.br/~popov/aulas/icpg/20081/Logica_Difusa_Artigo.pdf
- STATISTICA 12. 2016: USA Headquarters 2300 East 14th Street Tulsa, OK 7410.
- SHAHID, S.; NATH, S. K. & MAKSUD-KAMAL, A. S. M. 2002: GIS integration of remote sensing and topographic data using fuzzy logic for ground water assessment in Midnapur District, India. *Geocarto International* 17(3): 69-74.

- MANAP, M. A.; NAMPAK, H.; PRADHAN, B.; LEE, S.; SULAIMAN, W. N. A. & RAMLI, M. F. 2014: Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences* 7(2): 711-724.
- MANAP, M. A.; SULAIMAN, W. N. A.; RAMLI, M. F.; PRADHAN, B. & SURIP, N. 2013: A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences* 6(5): 1621-1637.
- D'ERCOLE, C.; GROVES, D. I. & KNOX-ROBINSON, C. M. 2000: Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralisation. *Australian Journal of Earth Sciences* 47(5): 913-927.
- RAHMATI, O.; SAMANI, A. N.; MAHDAVI, M.; POURGHASEMI, H. R. & ZEINIVAND, H. 2015: Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences* 8(9): 7059-7071.

Moisés Catanha. moisescatanha@hotmail.com

Universidade Agostino Neto.

Luanda. Angola.

Carlos Sacasas León. csl@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"

La Habana. Cuba.

José Pérez Lazo. jperezl@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"

La Habana. Cuba.