

Modelación de la aptitud ingeniero-geológica de los suelos de la ciudad de Luanda

Gabriela J. Pereira Teixeira-Pires
Héctor Manuel Fernández-Núñez
Carlos Sacasas-León

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo obtener, mediante lógica difusa, un modelo espacial de aptitud de los suelos de la ciudad de Luanda a partir de dos parámetros: litología y pendiente. Se detectaron zonas favorables para la construcción civil (infraestructuras urbanas y viales) y sectores con comportamiento diferenciado que pueden condicionar riesgos, lo que exige un reordenamiento territorial. El modelo establece orientaciones para la confección de la carta geotécnica para la ciudad de Luanda y sirve como instrumento que ayuda en el planeamiento territorial

Palabras clave: lógica difusa; cartografía geotécnica; modelación; ordenamiento territorial.

Modeling for the soil engineering-geological capabilities in the city of Luanda

Abstract

The objective of this investigation was to obtain, by means of fuzzy logic, a spatial model for the soil aptitude in the city of Luanda based on two parameters: lithology and slope. Favorable areas for civil constructions were identified (urban infrastructures and roads) and sectors with differentiated behavior that can pose a risk, requiring a territorial planning. The model establishes the directions for the preparation of the geotechnical map for the city of Luanda, which is a helpful instrument for the territorial planning.

Keywords: fuzzy logic; geotechnical mapping; modeling; territorial planning.

1. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Luanda y sus alrededores, en la última década, los suelos han sido objeto de innumerables intervenciones de obras socioeconómicas, a veces de forma incontrolada y no muy bien planificada, que han producido numerosas pérdidas por construcciones realizadas en lugares inadecuados que han provocado derrumbes o agrietamiento de las vías de comunicación y, en otros casos, han inducido problemas de inundaciones o deslizamientos de tierras. Todo esto tiene como causa fundamental la inexistencia de una cartografía geotécnica que oriente y ayude a una mejor planificación física de la ciudad.

Los suelos tienen usos muy diversos, por tal motivo, estudiar las propiedades que determinan su comportamiento, así como la aptitud para diferentes tipos de actividades, siempre ha constituido una parte importante en la confección de cualquier cartografía geotécnica.

Se ha utilizado la cartografía geotécnica para representar los productos de mapeo de las propiedades de los suelos (Baptista-Moitinho 1991); además del conocimiento de la geología para planeamiento regional y urbano. Por otra parte, Silva y colaboradores (2000) se refieren al mapeo geotécnico como el levantamiento de informaciones referentes a las características de los atributos del medio físico y al manejo y conservación de determinada porción del espacio. Silva (2000) trabaja en la cartografía ingeniero-geológica y peligros y riesgos de Almada. En tanto, Pires (2007) trata aspectos generales de la cartografía geotécnica para el ordenamiento para la ciudad de Luanda.

Han existido para la cartografía geotécnica diferentes metodologías a partir de la década del cincuenta, las cuales fueron aplicadas conforme a las necesidades y características de cada región, algunas son utilizadas hoy con determinadas adaptaciones (Guardado-Lacaba 1995; Cabrera 2002; Rodrigues & Augusto Filho 2007 citado por Franco *et al.* 2010; Ordaz-Hernández *et al.* 2012). Y otras no han atendido las condiciones ambientales, tecnológicas y socioeconómicas de cada país (Andrade 2005 citado por Franco *et al.* 2010).

Entre las metodologías para la cartografía geotécnica se destaca la presentada por la *International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG 1968) en la que se propone la creación de una comisión de mapeo ingeniero-geológico para desarrollar estudios que regulen la elaboración de la cartografía geotécnica y sus productos; además de una guía de preparación de mapas geotécnicos para la UNESCO (1976).

En 1976 la IAEG define que una carta o mapa geotécnico es un tipo de mapa geológico que clasifica y representa los componentes del ambiente físico de importancia en las actividades de ingeniería, planificación, construcción, operación y conservación del medio ambiente. Además, se refiere a la inclusión de las clasificaciones de los suelos y de sus propiedades ingenieriles.

Las metodologías de clasificación textural y las clasificaciones geotécnicas, expresadas en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (ASTM D 2487-85) y la clasificación *Highway Research Board* (HRB-AASHTO E 240-1970), son las más comúnmente utilizadas e incluyen la caracterización geotécnica de las unidades así como las propiedades mecánicas de los suelos y de las rocas (Silva 2000; Zuquete y Galdonfi 2011).

A partir de los años 60 se inicia la cartografía digital geotécnica, que aún incipiente con el desarrollo de la computadora, revoluciona la cartografía tradicional, pero todas ellas utilizan en ocasiones los mismos factores naturales, que una vez ponderados, clasificados o simplemente analizados, intervienen en la creación de los modelos que pueden ser validados o verificados con trabajos de campo.

El análisis de la aptitud de los suelos, desde el punto de vista geotécnico, no representa hechos absolutos, sino juicios relativos. Los modelos de diagnóstico y pronóstico que la componen, por más informaciones que posean, son abstracciones –o simplificaciones– de la realidad, que imponen la elección de determinados factores entre la enorme complejidad de los mismos, que afecta incluso áreas de pequeñas dimensiones. Más allá de este hecho, y en función del tipo de análisis, el proceso puede exigir la ponderación de la importancia relativa de los factores (sometidos a juicios subjetivos) que intervienen en los modelos creados y la adopción de algunos presupuestos basados también en juicios con diferentes grados de subjetividad (Azevedo 2004). El mismo autor refiere que la atribución de pesos envuelve cierto grado de subjetividad en el proceso de combinación de variables, sin embargo, actualmente se desarrollan herramientas matemáticas, en el campo de la inteligencia artificial, que ayudan a disminuir esta subjetividad, por ejemplo, las redes neuronales y la lógica difusa.

Los procesos de decisión pretenden satisfacer múltiples objetivos y son desarrollados con base en la evaluación de uno o varios criterios. Eastman (1997, citado por Ramos y Mendes 2001) en sus trabajos ha presentado el concepto de áreas de aptitud. Este término, según Partidario (1999), es la

mayor o a menor facilidad que una parcela dada del territorio presenta, en función de sus características biofísicas y del medio socioeconómico en el que se integra, para producir bienes o prestar servicios de forma equilibrada y con eficacia sin deteriorar su capacidad productiva o sus características intrínsecas.

El presente trabajo, caracterizado por factores de carácter subjetivo que imponen la elección de estos, según su grado de complejidad, hace necesario la aplicación de la lógica difusa de modo que permite la utilización de conceptos como "verdad parcial" –el conjunto verdad que se sitúa entre "enteramente verdadero" y "enteramente falso" (Zadeh 1960 citado por Jané 2004). Además, se utiliza como instrumento para modelar la incertidumbre y como metodología capaz de generalizar cualquier teoría, partiendo de una forma discreta para una forma continua. Los factores fueron analizados y combinados a través de la atribución de diferentes grados de valoración y posteriormente normalizados a través de la aplicación de la lógica difusa.

El objetivo del presente trabajo es presentar un modelo que describa la aptitud ingeniero-geológica de los suelos de la ciudad de Luanda utilizando las herramientas de geo-procesamiento que brinda la lógica difusa.

En este modelo se tuvieron en cuenta dos factores principales: la pendiente del relieve y los tipos de suelos, según los resultados de laboratorio y en las clasificaciones con base en SUCS y AASHTO, para conocer cuáles son los grupos de suelos predominantes en las diferentes unidades litológicas de la ciudad de Luanda, Angola.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización y caracterización del área

El área en análisis (Figura 1) fue la provincia de Luanda, capital de la República de Angola. Forma parte de la cuenca sedimentaria del Kwanza, con las cuencas sedimentarias que están genéticamente ligadas a la separación del Gondwana y a la apertura del Atlántico Sur, eventos que datan desde el Barremiano, final del Cretácico (Marinho 1957 citado por Brandão y Pires 1984).

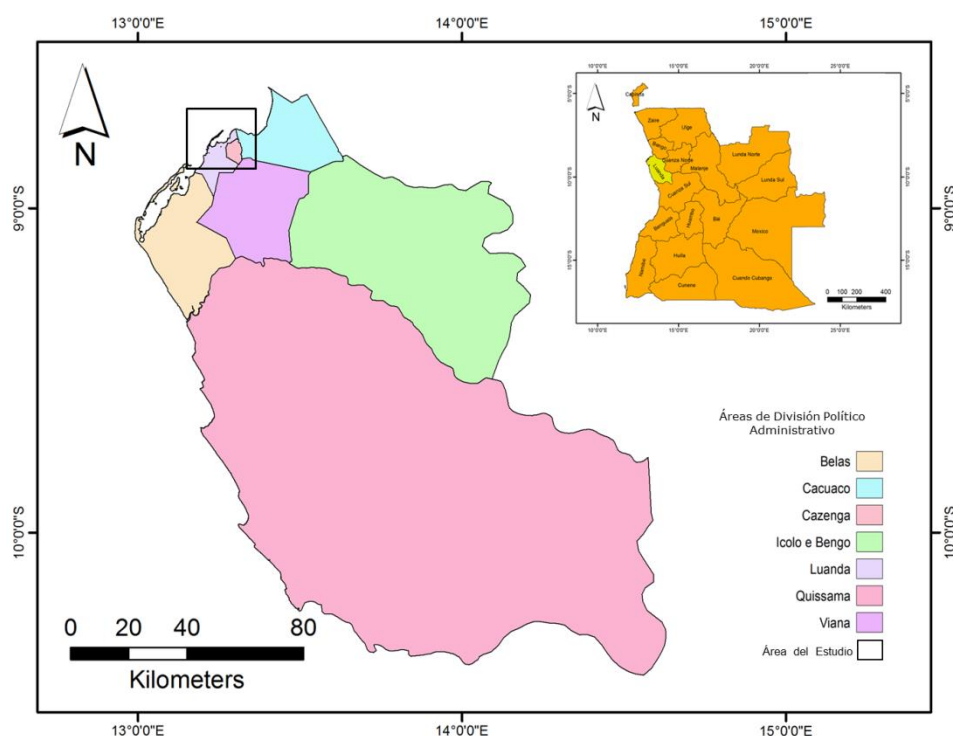


Figura 1. Localización del área de estudio en la provincia de Luanda.

En la región de Luanda se distinguen dos unidades litológicas: las someras, que corresponden a las unidades recientes del Pleistoceno y las del substrato del Plioceno y del Mioceno (Figura 2).

Las unidades recientes incluyen los terraplenes (A), los aluviones, constituidos por materiales heterogéneos y los sedimentos fluvio-lacustres (Al), las arenas de playa (ap) que constituyen las islas y cordones litorales, los depósitos de vertiente (a3) y conos de eyección (a2), los aluviones recientes (a1), que están asociados a las líneas de agua, y la unidad de las arcillas negras o arcillas del Cazenga (Q3). Las formaciones Quelo con dos unidades, arenas rojas (Q2) y arenas grises (Q1) constituidas esencialmente por arenas de edad Pleistocénica, se incluyen también en las unidades someras. Las unidades del substrato corresponden a la formación Luanda (p1) del Pliocénico, constituida por materiales no consolidados arenas, silicitos y arcillas y materiales consolidados arenitas y la formación Cacuo (m1c), constituida por carbonatos descompuestos y calizas.

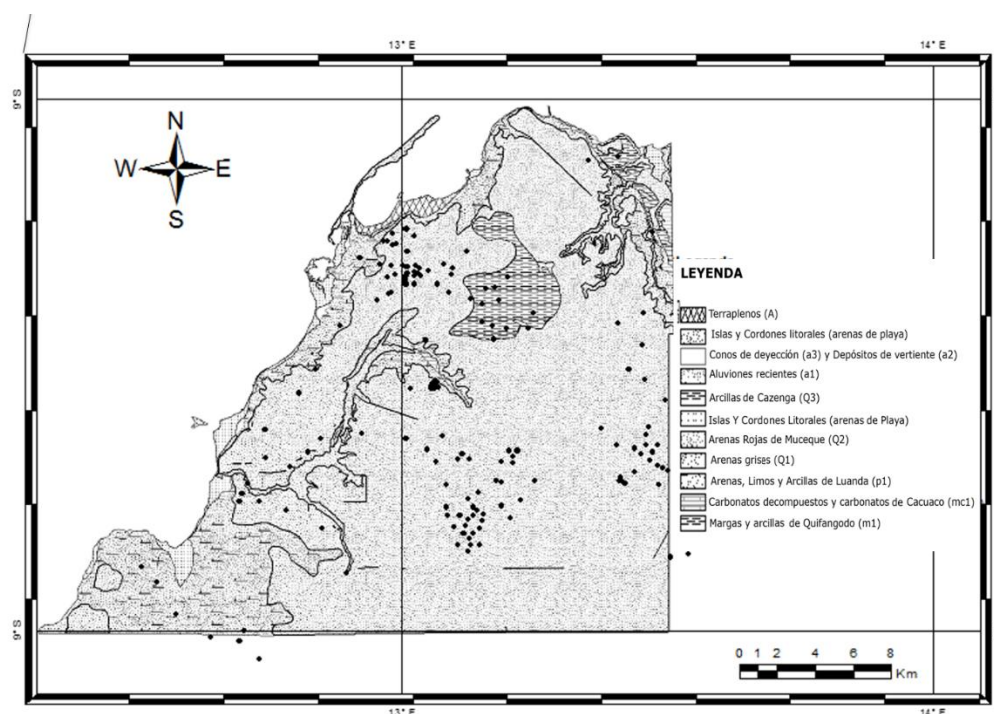


Figura 2. Carta litológica del área de la ciudad de Luanda y sus alrededores.

2.2. Metodología

Para la caracterización geotécnica del área se utilizaron informaciones recogidas de informes, que incluyen prospecciones, ensayos *in situ* y ensayos de laboratorio de muestreos realizados en el campo (pozos, y prospecciones con ensayos de penetración estándar - SPT) referentes a las diferentes unidades litoestratigráficas. Fueron utilizados documentos cartográficos (mapas topográficos y geológicos) para la evaluación y actualización de la distribución espacial de las unidades litológicas.

Los factores fueron analizados y combinados a través de la atribución de diferentes grados de importancia (valoración) y posteriormente normalizados a través de la aplicación de la lógica difusa.

La lógica difusa, con base en la teoría de los conjuntos nebulosos, se ha mostrado más adecuada para tratar defectos de información que la teoría de las probabilidades. De forma más objetiva y preliminar, se puede definir la lógica difusa, como una herramienta capaz de capturar informaciones vagas, en general descritas en un lenguaje natural y convertirlas para un formato numérico, de fácil manipulación por las computadoras (Jané 2004). Esta herramienta ha encontrado aplicación en diversas áreas (Ramos y Mendes 2001), con demostración en la capacidad de adaptación y facilidad de interface con el ser humano (Jané 2004).

El procedimiento para aplicación de la lógica difusa tiene, como base, necesariamente una matriz en la que las variables y sus posibles combinaciones son determinadas según su grado de aptitud, este hecho inicialmente envuelve un cierto grado de subjetividad. En cuanto a la subjetividad del análisis, esta está presente tanto en los procedimientos basados en operaciones matemáticas, desde el momento en el que son atribuidos pesos relativos o donde la selección de variables es necesaria.

Para la evaluación total de cada unidad lito-estratigráfica se realizó el cálculo de los valores ponderados, resultantes de la distribución de los tipos de suelos en las diferentes unidades geotécnicas, a lo cual se asoció la distribución porcentual y el conjunto difuso atribuido para cada grupo de suelos, logrando de esta forma una evaluación difusa para cada unidad litológica.

Para la valoración difusa de la pendiente se utilizó la función sigmoideal inversa y continuada que corresponde al intervalo logrado para la litología, manteniendo de esta forma el mismo peso para los dos parámetros.

El mapa de pendientes (Pires 2007), como se muestra en la Figura 3, presenta la morfología del terreno y los intervalos de clases utilizados son los que se utilizan en el ámbito de la cartografía geotécnica, en función de las limitaciones que se imponen al uso del suelo que son < 2 %, 2-5 %, 5-8 %, 8-15 % y > 15 %. Con relación a los fenómenos de erosión y deslizamientos se establecieron intervalos de pendiente expresados en grados y se indica, para cada intervalo, el equivalente en porcentaje, según la tabla de equivalencias presentada (Marsh 1978 citado por M.O.P.T. 1992).

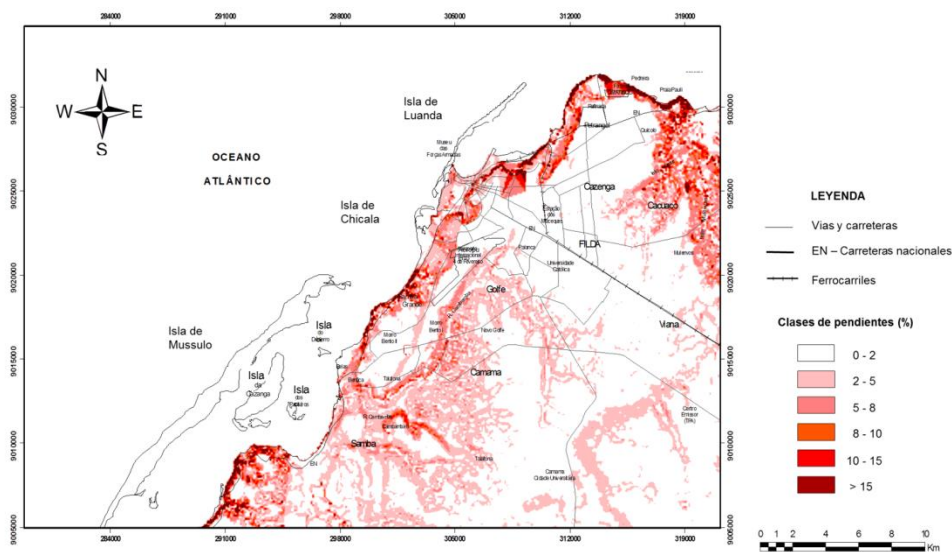


Figura 3. Carta de pendientes (Pires 2007).

3. RESULTADOS

3.1. Características de las unidades geotécnicas

Las unidades geotécnicas se distribuyen en unidades superficiales y subterráneas. Los terraplenes (A), a lo largo de la marginal, son constituidos por materiales heterogéneos, arcillo-arenosos, arenosos y pedregosos. Estos depósitos se encuentran sobre las arenas de playa, sobre los depósitos de vertiente o sobre depósitos fluviales marinos y constituyen los terraplenes en la parte baja de la ciudad. El espesor varía entre 2 m y 5 m, alcanzando un espesor máximo de 9 m.

Las arenas de playa (ap) ocupan una banda a lo largo del litoral y son constituidas por arenas heterogéneas, limpias, de granulometría variada, muchas veces con fragmentos de conchas. Estos depósitos alcanzan espesores en el orden de dos decenas de metros, en la isla de Luanda y en los depósitos a lo largo del marginal el espesor está en el orden de los cinco metros.

Los depósitos de vertiente (DV) están constituidos por materiales de carácter heterogéneos provenientes de las zonas elevadas, que ocupan la base de las vertientes en la zona baja de la ciudad de Luanda. Los conos de deyección (a2) son unidades constituidas por arenas y guijarros que abarcan áreas restringidas en la desembocadura de las líneas de agua.

Los depósitos de aluviones (Al) más antiguos ocupan los terrenos de cotas bajas. Son constituidos por depósitos fluviales marinos, con arenas de granulometría variada y arcillas.

Los aluviones recientes (a1) que constituyen los depósitos heterogéneos de arenas y guijarros se encuentran en el fondo de los valles del río Cambamba y Cambolombo, al sur de Luanda; en tanto al norte estos depósitos son encontrados en el valle Mulenvos.

Las arcillas de Cazenga (Q3) presentan espesores que varían entre 1,5 m a 6 m y son constituidas por arcillas arenosas y arcillas limosas, arenas limosas y arenas arcillosas y limos arcillosos o arenosos. El porcentaje de arcilla varía entre 8 % y 71 %, de limos entre 3 % a 51 % y de arena entre 11 % y 73 %. El límite de liquidez varía entre 30 % y 74 % y el índice de plasticidad entre 8 % y 45 %. Son suelos de baja a alta plasticidad. Los suelos finos son del grupo CL, CH, MH, y ML, que corresponden a los grupos A-6, A-7-5 y A-7-6 y los suelos gruesos son del grupo SC, que son materiales granulares que corresponden a los grupos A-2-4 y A-4, con índices de grupo inferiores a 2. Los minerales presentes en la muestra total son: cuarzo, feldespatos y vestigios de calcita. En la fracción arcillosa se

encuentran la caolinita, illita y esmectites, cuya presencia confiere propiedades particulares a esta unidad.

Las arenas de Quelo cubren la mayor parte del área de la planicie de Luanda y forman los terrenos someros del tope de las terrazas costeras, con espesores próximos a cuatro metros, que disminuyen en el tope de los terrenos litorales a menos de un metro. En el área urbana esta planicie alcanza espesores entre 4 m y 12 m. Los suelos están constituidos por arenas, arenas limosas, arenas arcillosas, limos y arcillas limosas o arenosas. El límite de liquidez varía entre 13 % a 44 %, el límite de plasticidad entre 9 % y 25 % y el índice de plasticidad entre 1 % y 22 %. Son suelos con baja plasticidad y, en general, son suelos no plásticos. La actividad corresponde a las arcillas inactivas y activas con valores entre 0,09 a 1. Los suelos más gruesos son de los grupos SW-SM, SP-SM, SM, SC, que corresponden a los materiales granulares de los grupos A-2-4 y A-3, con índice de grupo igual a cero. Los suelos finos son de los grupos CL y ML, que corresponden a los materiales silíceos arcillosos de los grupos A-4, con índice de grupo inferior a 7, A-6 con índice de grupo inferior a 8 y A-7-6 con índice de grupo inferior a 12.

Las unidades del substrato comprenden:

Las arenas, arcillas y limos de Luanda: tienen una amplia distribución geográfica y bajo las arenas del Quelo, constituyen los suelos del substrato en casi toda el área de la provincia de Luanda. Se trata de suelos con arenas, arenas limosas y arenas arcillosas; limos arenosas y limos arcillosos; arcillas y arcillas limosas y arenosas. Los suelos más gruesos son del grupo SW, SM, SC, SP, SW-SM, SP-SM y SC-SM, que corresponden a los grupos A-1, A-2-4, y A-3, con índice de grupo (0). Los suelos finos son CL, ML, CH, MH, CL-ML, que corresponden a los suelos silíceos-arcillosos de los grupos A-4, A-6, A-7-5 y A-7-6. Las arenas presentan baja plasticidad con límite de liquidez entre 19 % y 28 % e índice de plasticidad entre 3 % y 12 %; las arcillas tienen límite de liquidez entre 23 % y 33 %, e índice de plasticidad entre 7 % y 39 %, que representan materiales de plasticidad baja a alta. Los limos y las arcillas presentan plasticidad alta a muy alta, con límite de liquidez entre 57 % y 75 % e índice de plasticidad entre 25 % y 39 %.

Los carbonatos de Cacuo: son rocas calizas detríticas pulverulentas, más o menos dolomitizadas y afloran en áreas muy reducidas, constituyendo dos manchas en el planalto de Luanda. La mayor extensión se observa a lo largo de la costa al norte de Luanda, desde el Puerto Pesquero al Faro de las Langostas. La mayor exposición de estas unidades es visible en la

terrazza de San Pedro de la Barra donde los carbonatos y calizas fosilíferas poseen estructura maciza y en el yacimiento de SECIL. Como consecuencia de diversas fases y procesos de alteración, los carbonatos de Cacuaco estuvieron en la génesis de las arcillas de Cazenga, más recientes y de otros tipos de suelos de alteración, agrupada en la designación de "carbonatos descompuestos de Cacuaco", que son constituidos por arcillas, arcillas arenosas, arenas arcillosas, arenas limosas y limos. Estos suelos presentan plasticidad baja a alta; el límite de liquidez se encuentra entre 24 % y 79 % y el índice de plasticidad entre 3 % y 46 %. Los suelos constituyentes son, según la clasificación unificada de los grupos, SM, CL y CH, que corresponden a los grupos A-4, A-2-4, A-6, A-7-5 y A-7-6, con índices de grupo entre 8 y 20.

Las arcillas y margas de Quifangondo: están constituidas por arcillas y margas con intercalaciones de calizas, las cuales pueden ser de tipo arcillas, arcillas limosas, limos y limos arcillosos. En estos suelos las cantidades de arcilla son elevadas hasta 82 %, el porcentaje de sílice varía entre 40 % y 100 % y el de arena varía hasta 41 %. Los suelos pertenecen a los grupos MH, CH y OH, que corresponden a los suelos de los grupos A-6, A-7-5 y A-7-6. El límite de liquidez se encuentra entre 49 % y 86 % y el índice de plasticidad entre 27 % y 47 %, que representan plasticidad alta a muy alta. La distribución porcentual de los grupos de suelos en Luanda, según las unidades litológicas y de acuerdo con la SUCS (ASTM D 2487-85), que se utiliza para la ingeniería y la HRB-AASHTO (E 240-1970), que se destinan para fines viales, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de los grupos de suelos, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y según la clasificación HRB-AASHTO

CLASIFICACIÓN	Tipo de suelo	Símbolo del grupo	Descripción materiales constituyentes más frecuentes y significativos	Unidades geológico-geotécnicas/distribución en porcentajes				
				Arcillas del Cazenga (Q3)	Arenas de Quelo (Q2;Q1)	Arenas, arcillas y limos de Luanda (p1)	Carbonatos descompuestos y Carbonatos de Cacuo (p1)	Arcillas y margas de Quifangondo (m1)
SUCS	Suelos de grano grueso	SW	Arenas bien equilibradas o arenas gravosas			1		
		SM	Arenas limosas, mezclas arena/limo		42	29	33	
		SC	Arenas arcillosas, mezclas arena/arcilla	20	24	3		
		SP	Arenas pobremente equilibradas o arenas gravosas		3	6		
		SW-SM	Arenas bien equilibradas con limo			1		
		SW-SC	Arenas bien equilibradas con arcilla					
		SP-SM	Arenas pobremente equilibradas con limo		4	12		
		SP-SC	Arenas pobremente equilibradas arcillo-limosas			12		
		SC-SM	Arenas limosas, arcillosas, mezclas limo-arcilla		18	3		
	Suelos de grano fino	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas con débil plasticidad	13	3	8		
		CI	Arcillas inorgánicas con plasticidad baja/media	13	6	19	11	4
		MH	Limos inorgánicos, limos elásticos	41		11		49
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas			10	56	47
		CL-ML	Limos y arcillas inorgánicos de baja plasticidad			1		
		CH	Arcilla orgánica de plasticidad media/alta limo orgánico					
HRB/AASHTO	MATERIALES GRANULARES	A-1-a			1			
		A-2	Fragmentos de rocas, gravas y arenas					
		A-1-b						
		A-3	Arena fina			40		
		A-2-4	Grava limosa o arcillosa y arena	7	73	2	36	2
		A-2-5	Grava limosa o arcillosa y arena					
	MATERIALES LIMOSOS	A-2-6	Grava limosa o arcillosa y arena	7	3			
		A-2-7	Grava limosa o arcillosa y arena					
		A-4	Suelos limosos		8	21		2
		A-5	Suelos limosos					
		A-6	Suelos arcillosos	7	11	11	18	
		A-7-5	Suelos arcillosos	7		17	9	80
	A-7	A-7-6	Suelos arcillosos	66	1	9	37	16

Teniendo en cuenta la distribución de la clasificación SUCS (Tabla 1) y considerando los resultados de Correia (1988), fueron transformados los diferentes grupos de suelos en un conjunto de valores difusos en el intervalo $[0,15; 0,63]$, tal como se muestra en la Tabla 2. Cada unidad litológica presenta comportamiento diferenciado debido a la presencia de determinados grupos de suelos, así tenemos condicionamientos en cuanto a utilización o ante una solicitud.

Tabla 2. Valoración de los grupos de suelos con base en la clasificación SUCS, modificado con la lógica difusa

Suelos de grano grueso	Símbolo	GW	GP	GM	GC	SW	Sp	SM	SC
	Valoración	0,99	0,94	0,89	0,84	0,79	0,74	0,69	0,64
	Símbolo	SW-SM		SW-SC	SP-SM	SP-SC		SC-SM	
	Valoración	0,59		0,54	0,49	0,44		0,39	
Suelos de grano fino	Símbolo	CL	ML	OL	CH	MH	OH	CL-ML	
	Valoración	0,34	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	

Los grupos de los suelos que constituyen las unidades someras, como las arcillas del Cazenga, las arenas de Quelo y arenas grises, bien como las unidades del substrato arenas, limos y arcillas de Luanda, carbonatos descompuestos y rocas calizas de Cacuaco y las arcillas y margas de Quifangondo, son constituidas por grupos de suelos ya estudiados.

Fue realizada, de igual manera, una valoración de los grupos de suelos para las unidades litológicas con base en la clasificación HRB-AASHTO. En este intervalo el valor máximo alcanzado fue de 0,99 y el valor mínimo fue de 0,08 (Tabla 3).

Tabla 3. Valoración de los grupos de suelos con base en la clasificación HRB-AASHTO, modificado con la lógica difusa

Suelos granulares						
A-1		A-3		A-2-4		
A-1-a	A-1-b	A-2-4		A-2-5	A-2-6	A-2-7
0,9999	0,9167	0,8333	0,7500	0,6667	0,5833	0,5000
Suelos limo-arcillosos						
A-4		A-5		A-7		
A-6		A-7-5		A-7-6		
0,4167	0,3333	0,2500	0,1667	0,0833		

Para la valoración difusa de la pendiente el intervalo obtenido fue $[0,15; 0,63]$ que corresponde al intervalo logrado para la litología, manteniendo de esta forma el mismo peso para los dos parámetros, donde

los valores cercanos a cero (0) son los que corresponden a los declives altos (menos favorables); mientras que los valores próximos a 0,63 representan los declives bajos (más favorables).

Tabla 4. Valoración de los intervalos de pendientes del terreno, según la lógica difusa

Clasificación	Muy suave a suave			Moderado		Alto
Intervalos (%)	< 2	2 - 5	5 - 8	8 -10	10 -15	> 15
Valoración	0,630	0,525	0,420	0,315	0,210	0,105

Las unidades someras (terraplenes, arenas de playa, aluviones, depósitos de vertiente y conos de deyección) fueron evaluadas nuevamente de forma subjetiva, por escasez de datos y debido a ausencia de datos relativos a los ensayos de laboratorio, considerándose así la litología descrita en los perfiles de las prospecciones existentes en los informes. En este caso fueron observadas varias muestras y fue atribuida una valoración por extrapolación. Los grupos de suelos que constituyen las unidades someras, como las arcillas del Cazenga, las arenas rojas y las arenas grises del Quelo, así como las unidades del substrato arenas, silices y arcillas de Luanda, carbonatos descompuestos y los carbonatos de Cacuaco, las arcillas y las margas de Quifangondo, están constituidos por los grupos de suelos que sirvieron de base para este trabajo.

Para la evaluación total de cada unidad lito-estratigráfica se realizó nuevamente el cálculo de los valores ponderados resultantes de la distribución de los tipos de suelos en las diferentes unidades geotécnicas, lo cual se asoció a la distribución porcentual y el conjunto difuso atribuida para cada grupo de suelos, logrando de esta forma una evaluación difusa para cada unidad litológica (Tabla 5).

Tabla 5. Valoración de los grupos de suelos en las diferentes unidades geotécnicas, modificados con la lógica difusa

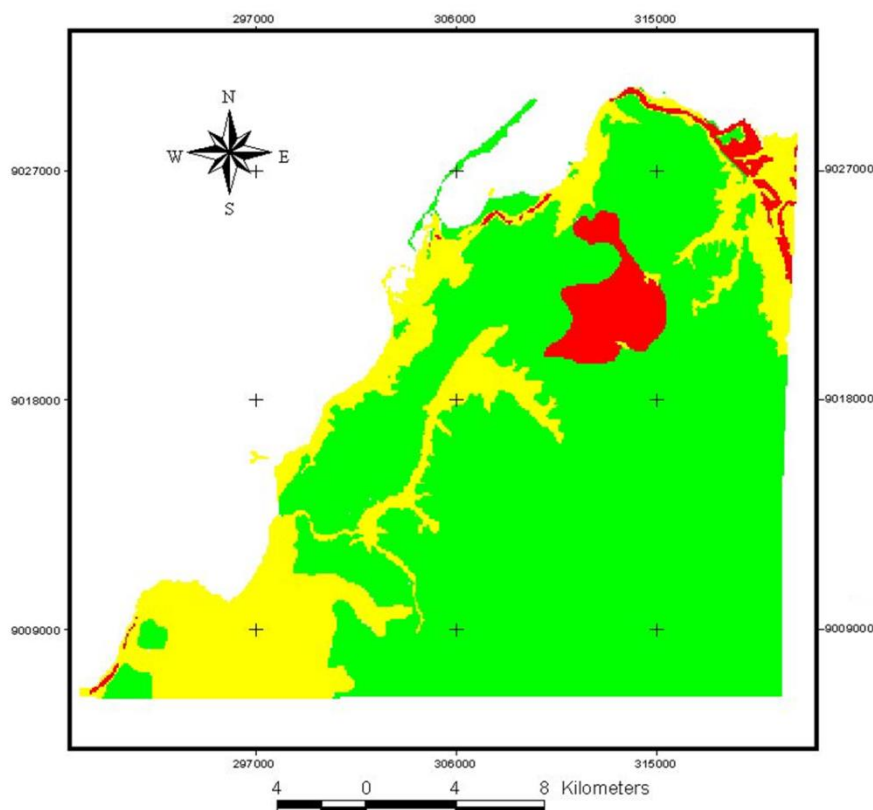
Unidades geotécnicas	Valoración SUCS	Valoración HRB- AASHTO
Islas y cordones litorales	0,5	0,56
Terraplenes	0,5	0,57
Aluviones (sedimentos fluvio-marinos)	0,4	0,16
Conos de deyección y depósitos de vertiente	0,5	0,56
Aluviones recientes	0,5	0,53
Arcillas de Cazenga	0,3	0,19
Arenas rojas (Quelo)	0,6	0,63
Arenas grises (Quelo)	0,6	0,60
Arenas, arcillas y limos de Luanda	0,4	0,4
Carbonatos descompuestos y carbonatos de Cacuo	0,4	0,36
Margas y arcillas do Quifangondo	0,2	0,17

El modelo presentado resulta de la combinación de dos mapas fuzzy temáticos litológicos, con base en las clasificaciones SUCS y HRB-AASHTO y los de declive, utilizando la extensión ARCSDEM (Sawatzky *et al.* 2004) de ArcGis, definiéndose el operador lógico AND como el más aceptable, para la creación de mapas de aptitud (Figura 4). Los resultados logrados con este operador se presentan más conservadores que los otros operadores, adaptándose mejor a las necesidades de este análisis.

Las áreas no favorables incluyen las arcillas de Cazenga, debido a la presencia en la fracción de arcillas del grupo esmectita (montmorillonita), lo cual influye en su comportamiento expansivo.

Las unidades geotécnicas ampliamente distribuidas son las arenas del Quelo, que son las capas más superficiales y presentan grupos de suelos que proporcionan comportamiento de bueno a regular, favorables ante las diferentes solicitudes.

Las arenas, arcillas y los limos de Luanda componen una gran variedad de grupos de suelos con materiales granulares, que incluyen los grupos con una utilización ingeniero-geológica favorable, en tanto las áreas con arcillas y margas son no favorables porque predominan los limos arcillosos, como ilustra la Tabla 1.



LEYENDA

APTITUD:

- No favorables: suelos muy arcillosos e impermeables
- Favorables con reservas: suelos muy heterogéneos
- Favorables: suelos arenosos

Figura 4. Mapa de aptitud ingeniero-geológica de los suelos de la ciudad de Luanda
Para el análisis de la aptitud, teniendo en cuenta las condiciones geológicas, en particular las características geotécnicas y algunos elementos de la geomorfología (pendiente), se muestra un escenario de las áreas favorables a la ocupación y áreas no favorables asociada a los riegos.

4. CONCLUSIONES

El empleo de la lógica difusa para la evaluación de los suelos, teniendo en cuenta aspectos relacionados con la calidad geotécnica y la pendiente como factor geomorfológico, permitió definir que los suelos de la ciudad de Luanda poseen una aptitud ingeniero-geológica en la que se detectan zonas favorables para la construcción civil (infraestructuras urbanas y viales) y sectores con comportamiento diferenciado que pueden condicionar riesgos,

lo que exige un reordenamiento territorial en los actuales uso del desarrollo general constructivo de la ciudad.

5. REFERENCIAS

- AZEVEDO, J. R. R. 2004: A análise de aptidão como instrumento de planeamento de empreendimentos imobiliários e de lazer de base natural. V Seminário Internacional de LARES. S. Paulo, Brasil. Disponible en: www.lares.org.br/SL4A_azevedo.pdf.
- BAPTISTA-MOITINHO, I. M. 1991: *Características geotécnicas dos solos de Lisboa*. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Lisboa, 391 p.
- BRANDÃO, M. G. P. & PIRES, E. S. 1984: Bacias Sedimentares de Angola. (Compilação, arranjo e actualização de vários artigos) 40 p.
- CABRERA, C. 2002: *Introducción al catastro ingeniero-geológico y geoambiental de la provincia de Pinar del Río. Aplicando tecnología SIG*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río, 130 p.
- CORREIA, A. G. 1988: Revisão da classificação de solos para propósitos de engenharia. *Geotecnia* 52: 75-90.
- FRANCO, G. B.; MARQUES, E. A. G.; CALIJURI, M. L.; GOMES, R. L. 2010: Cartografia geotécnica: estágio atual do conhecimento-geotechnical cartography: actual state knowledge. *Caminhos de Geografia* 11(35).
- GUARDADO-LACABA, R. 1995: Para la regionalización ingeniero-geológica. *Minería y Geología* 12(2): 3-9.
- JANÉ, D. A. 2004: Uma introdução ao estudo da lógica fuzzy. *Hórus Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas* 2: 1-16. Disponible en: www.faeso.edu.br/horus/artigos%20anteriores/2004/artigo_dario.pdf
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES (M.O.P.T) (1992): Guía para La elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología. 2ª edición. Monografías de la Secretaría del Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente, 572 p.
- ORDAZ-HERNÁNDEZ, A.; CHUY, T. J.; HERNÁNDEZ-SANTANA, J. R. & GARCÍA, J. A. 2012: División geológico-geotécnica aplicada a la zonación sísmica urbana: San Cristóbal, Cuba Occidental. *Cuaternalario y Geomorfología* 26(1-2): 89-104.
- PARTIDARIO, M. R. 1999: Introdução ao Ordenamento do Território. Universidade Aberta, Lisboa, 210 p.
- PIRES, G. J. P. T. 2007: *Caracterização geológica e geotécnica dos solos de Luanda para o Ordenamento do Território*. Tese de Mestrado. Universidade de Lisboa, 218 p.
- RAMOS, R. A. R. & MENDES, J. F. G. 2001: Avaliação da aptidão do solo para localização industrial: O caso de Valença. *Engenharia Civil* 10: 7-30. Disponible en: www.civil.uminho.pt/cec/revista/Num10/Pag_7-30.pdf.

- SAWATZKY, D. L.; RAINES, G. L.; BONHAM-CARTER, G. F. & LOONEY, C. G. 2004: ArcSDM: ArcMAP extension sea spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis.
- SILVA, A. P. F. 2000: *Cartografia Geotécnica do Concelho de Almada e o Sistema de Informação Geo-Almada*. Dissertação de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa, 341 p.
- SILVA, C. E.; PEDROSA, L. E.; DIAS, L. M. C.; MORENO, M. I. C. & NISHIYAMA, L. 2000: Mapeamento Geotécnico da Folha Córrego das Moças, no Município de Uberlândia- MG. *Caminhos da Geografia* 1(2): 1-24. Disponible en: http://www.ig.ufu.br/revista/volume02/artigo01_vol02.pdf
- UNESCO – IAEG. 1976: Engineering geological mapping. A guide to their preparation. Commission on Engineering Geological Maps of the IAEG. Earth Sciences, 15, The Unesco Press, 79 p.
- ZUQUETE, L. V. & GANDOLFI, N. 2011: *Cartografia geotécnica*. Oficina de Textos, São Paulo, 190 p.

Gabriela J. Pereira Teixeira-Pires, gabrielapires@hotmail.com
Máster en Geología Aplicada y Economía. Profesora Auxiliar.
Departamento de Geología, Facultad de Ciencias.
Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola

Héctor M. Fernández-Núñez, hector@civil.cujae.edu.cu
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Cuba

Carlos Sacasas León, cs1@civil.cujae.edu.cu
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Cuba