



Universitat Autònoma de Barcelona

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús establertes per la següent llicència Creative Commons:  [http://cat.creativecommons.org/?page\\_id=184](http://cat.creativecommons.org/?page_id=184)

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <http://es.creativecommons.org/blog/licencias/>

**WARNING.** The access to the contents of this doctoral thesis it is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>

**UAB**

Universitat Autònoma de Barcelona

**BIOGEOGRAFÍA Y PATRONES ACTUALES DE  
COMPOSICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL PATRÓN LEOPARDO  
(LEOPARD BUSH) AL NORTE DE SUR AMÉRICA.**



**TESIS DOCTORAL**

**JOSE EDUARDO FUENTES DELGADO**

# **BIOGEOGRAFÍA Y PATRONES ACTUALES DE COMPOSICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL PATRÓN LEOPARDO (LEOPARD BUSH) AL NORTE DE SUR AMÉRICA.**

---

**José Eduardo Fuentes Delgado**

- Octubre 2016 -

TESIS DOCTORAL

Departamento de Geografia  
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)  
Programa de Doctorado en Geografia

Directores

Prof. Dr. Marti Boada Junca  
- Departamento de Geografia UAB-

Prof. Dr. Diego Varga Linde  
- Departamento de Geografia UDG-





## **Dedicatoria**

*Esta tesis está dedicada a todas las personas que creyeron en mí durante los últimos años y me han apoyado de una u otra manera, especialmente mi abuelita Susana (Q.D.E.P) mi madre Olga, mi tía Gloria, mi hermano Gustavo, mi sobrina Sara, mi novia Tatiana, mi prima Marlene, mi amiga Ana y a todos y cada uno de mis familiares, amigos y profesores; que con su ánimo y buenos deseos me han apoyado en este largo trasegar detrás de mis sueños y metas de vida.*



*-Las geografías -dijo el geógrafo- son los libros más preciados e interesantes; nunca pasan de moda. Es muy raro que una montaña cambie de sitio o que un océano quede sin agua. Los geógrafos escribimos sobre cosas eternas.  
(El Principito) Antoine de Saint-Exupéry*

*«Una locura es hacer la misma cosa una y otra vez esperando obtener resultados diferentes. Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo».  
Albert Einstein*





## **Agradecimientos**

*Esta tesis ha sido posible gracias a la financiación de la beca PROGRAMA NACIONAL DE FORMACION DE INVESTIGADORES. CONVOCATORIAS AÑO 2012 - 568 EXTERIOR otorgada por el DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN-COLCIENCIAS COLOMBIA, enmarcada dentro del programa nacional de formación doctoral de alto nivel. Al autor le gustaría expresar su profundo agradecimiento a los profesores Martí Boda y Diego Varga por su amistad y ayuda inestimable a la hora de guiar esta tesis, así como a todos los compañeros y conocidos de la Universidad Autónoma de Barcelona y del Instituto de Ciencias y Tecnologías Ambientales ICTA de la UAB.*



## Resumen

Esta tesis doctoral tiene como objetivo estudiar y determinar los aspectos biogeográficos vinculados a la distribución y composición actual del patrón Leopardo en la Península de la Guajira para contribuir a su conocimiento, conservación y manejo. Para alcanzar esta finalidad, se aíslan las condiciones ambientales específicas de la Guajira que determinan el porqué de su existencia y partiendo de la tesis de que la distribución y composición del patrón Leopardo en la Península de la Guajira es originada por la interacción entre los aspectos antrópicos asociados con los aspectos ambientales tales como el viento, el agua y la geomorfología siendo esta interacción la que produce en ciertas partes del paisaje la acumulación de nutrientes en el suelo donde se desarrollan las formaciones vegetales.

La presente investigación se basó en un enfoque biofísico (Hipotético – Deductivo) que integra tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota (PR), con el propósito de entender el comportamiento de los parches de vegetación Leopardo a través de construcción de modelos geoespaciales, información secundaria y levantamiento de información primaria (Biofísica y medio social) que permitieron conocer el contexto biogeográfico del patrón en la Península de la Guajira. Se utilizó información recabada en campo, imágenes de satélite de alta resolución (1:5000) históricas (Corona KH-4A) y actuales (QuickBird, EROS-B), así como, modelos de elevación digitales para producir mapas de distribución de la vegetación con el objetivo de estudiar y caracterizar el área con un proceso cartográfico de alta resolución. Se realizó un modelo mundial de la distribución potencial de la vegetación Leopardo utilizando un modelo de máxima entropía junto con predictores ambientales y datos de presencia tomados en campo y referencias bibliográficas.

Los resultados permitieron conocer que en el paisaje existían ciertos lugares que permiten un desarrollo especial de la vegetación, las cuales mostraron que características relevantes como el material parental, la geomorfología y los suelos desarrollaban un ambiente particular en donde se ubicaba la vegetación. En este ambiente particular se encontraron unidades de paisaje que conformaban las áreas donde se encuentra ubicado el patrón Leopardo. Análisis de los nutrientes presentes en el suelo mostraron como varían los valores de N, P, K en los suelos desnudos y en las islas de fertilidad conformadas por la vegetación.

Se concluye que la formación del patrón Leopardo es el resultado de la interacción de seis factores básicos que los conforma (Paisajes, isla de fertilidad, fragmentación de la vegetación, influencia antrópica, herbivorismo). Se desarrollan unas características geomorfológicas, edafológicas y climáticas específicas que limitan las formas de vida vegetales que se pueden desarrollar, al limitarse el desarrollo vegetativo a solo ciertas especies resistentes a condiciones extremas, estas conforman asociaciones y a su vez generan estrategias para optimizar los recursos disponibles. La principal estrategia es aprovechar el viento en el área para fijar nutrientes en la tierra por medio de la retención de sedimentos lo que conlleva a la modificación de la humedad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo, finalmente, este equilibrio es perturbado por las actividades humanas a través de la ganadería de ungulados y de las actividades antrópicas, generando la heterogeneidad de suelos y de vegetación cuya interacción genera el patrón.

## **Abstract**

This thesis aims to study and determine the biogeographical aspects related to the current distribution and composition of the Leopard pattern in the Guajira Peninsula to contribute to its knowledge, conservation and management. To achieve this purpose, specific environmental conditions of the Guajira are isolated to determine the reason for its existence and based on the thesis that the distribution and composition of the Leopard pattern in the Guajira Peninsula originates from the interaction between anthropic aspects in association with environmental aspects such as wind, water and geomorphology being that this interaction occurs, produce in certain parts of the landscape, an accumulation of nutrients in the soil where the plant formations are developed.

This research was based on a biophysical approach (Hypothetical - Deductive) that integrates Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) technologies, for the purpose of understanding the behavior of the Leopard vegetation patches through the building of geospatial models, secondary information and primary information (biophysics and social environment) that allows us to know the biogeographic context of the pattern in the Guajira Peninsula. Information from satellite images of high resolution historic (Corona KH-4A) and present (QuickBird, EROS-B) was utilized, as well as digital elevation models to produce distribution maps of vegetation with the objective of studying and characterizing the area with a high-resolution mapping process. A global model of the potential distribution of Leopard vegetation was made using a maximum entropy model with environmental predictors, present data taken in the field, and bibliographic references.

The results allowed for the understanding that within the landscape, existed certain places that allow a special development of the vegetation, which showed what relevant characteristics like the parent material, the geomorphology and the soils developed a particular environment where the vegetation was located. In this particular environment units of landscape were found to form the areas in which the Leopard pattern are located. Analysis of nutrients present in the soil showed how the values as vary of N, P, K on bare soils and fertility islands formed by the vegetation.

It is concluded that the formation of the Leopard pattern is the result of the interaction of six basic factors that shapes it (Landscapes, island of fertility, fragmentation of the vegetation, anthropogenic influence, herbivory). They develop geomorphological, edaphological and climatic characteristics which limit the forms of plant life that can develop, the limited vegetative growth only develop certain strains resistant to extreme conditions, and these form associations that in turn generate strategies to optimize the available resources. The main strategy is to harness the wind in the area to fix nutrients in the soil through sediment retention which leads to changes in moisture and nutrient availability in the soil, finally, this equilibrium is disturbed by human activities through the raising of ungulates and anthropic activities, generating the heterogeneity of soils and vegetation whose interaction generates the pattern.



## Tabla de contenido

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>- 23 -</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>- 25 -</b>
<b>1.2 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>- 34 -</b>
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	<b>- 35 -</b>
<b>1.4 HIPOTESIS</b> .....	<b>- 35 -</b>
<b>1.5 ESTRUCTURA DE TESIS</b> .....	<b>- 36 -</b>
<b>1.6 ÁREA DE ESTUDIO Y CONTEXTO GENERAL</b> .....	<b>- 37 -</b>
1.6.1 Historia y aspectos sociales de península de la Guajira .....	- 39 -
1.6.2 Ordenamiento territorial y clanes .....	- 40 -
1.6.3 Cartografía histórica .....	- 41 -
<b>II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>- 46 -</b>
<b>2.1 AMBIENTES ÁRIDOS</b> .....	<b>- 46 -</b>
2.1.1 Población en ambientes áridos.....	- 46 -
2.1.2 Índices de aridez .....	- 47 -
2.1.3 Causas de la aridez.....	- 49 -
2.1.5 Suelos de regiones áridas .....	- 50 -
2.1.6 Macronutrientes en suelos áridos .....	- 51 -
2.1.7 Recurso agua en zonas áridas .....	- 53 -
<b>2.2 INTERACCIONES DE LA VEGETACIÓN EN ZONAS SECAS</b> .....	<b>- 53 -</b>
2.2.1 Teoría de islas .....	- 54 -
2.2.2 Isla de fertilidad o de recursos.....	- 55 -
2.2.3 Evolución convergente y evolución paralela .....	- 55 -
<b>2.3 ENFOQUE GEOPEDOLÓGICO Y FISIGRÁFICO</b> .....	<b>- 56 -</b>
2.3.1 Sistema CIAF de clasificación fisiográfica.....	- 58 -
2.3.2 Paisaje Fisiográfico.....	- 60 -
2.3.3 Subpaisajes .....	- 60 -
<b>2.4 IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS ESPACIAL EN PATRONES VEGETALES</b> .....	<b>- 61 -</b>
2.4.1 Geomorfometría .....	- 61 -
2.4.2 Índice de posición topográfica.....	- 63 -
2.4.3 DSM y DTM .....	- 65 -
2.4.4 Escala de Beaufort .....	- 66 -
2.4.5 Rugosidad del terreno .....	- 67 -
<b>III. MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>- 70 -</b>
<b>3.1 PATRÓN LEOPARDO A ESCALA GLOBAL</b> .....	<b>- 71 -</b>
3.1.1 Muestra de patrones (Presencia).....	- 71 -
3.1.2 Variables ambientales y datos climáticos .....	- 73 -
3.1.3 Modelo de distribución potencial .....	- 74 -
3.1.4 Evaluación del rendimiento general del modelo .....	- 74 -
3.1.5 Distribución potencial del patrón Leopardo .....	- 75 -
<b>3.2 PATRÓN LEOPARDO EN LA GUAJIRA</b> .....	<b>- 80 -</b>

3.2.1	Materiales .....	82 -
3.2.1.1	<i>Datos cartográficos</i> .....	82 -
3.2.1.2	<i>Imágenes de satélite y fotografía aérea</i> .....	82 -
3.2.1.3	<i>Información meteorológica local</i> .....	86 -
3.2.1.4	<i>Equipos e instrumentos</i> .....	87 -
3.2.1.5	<i>Estadísticas</i> .....	90 -
3.2.2	Diseño muestral .....	91 -
3.2.2.1	<i>Escala de trabajo en campo</i> .....	91 -
3.2.2.2	<i>Tamaño de la muestra</i> .....	91 -
3.2.2.3	<i>Esquema de muestreo</i> .....	92 -
3.2.3	Salida de campo .....	92 -
3.2.3.1	<i>Salida de campo reconocimiento península de la Guajira</i> .....	92 -
3.2.3.2	<i>Salida de campo Cabo de la vela</i> .....	94 -
3.2.3.3	<i>Modelo de superficie (DSM)</i> .....	96 -
3.2.3.4	<i>Modelado de los parámetros del sensor</i> .....	96 -
3.2.3.5	<i>Generación del DSM y DTM</i> .....	98 -
3.2.3.6	<i>Mapas de cobertura y usos del suelo</i> .....	100 -
3.2.3.7	<i>Corrección y calibración</i> .....	101 -
3.2.3.8	<i>Georreferenciación y orthorectificación</i> .....	101 -
3.2.3.9	<i>Segmentación de imágenes y clasificación</i> .....	102 -
3.2.3.10	<i>Mapas de cobertura y uso</i> .....	104 -
3.2.3.11	<i>Evaluación de precisión de los mapas de cobertura</i> .....	105 -
3.2.4	Insumos fisiográficos .....	105 -
3.2.4.1	<i>Mapa de índice de posición topográfica TPI</i> .....	106 -
3.2.4.2	<i>Modelo de sombras</i> .....	107 -
3.2.4.3	<i>Mapa geomorfológico (Geoformas)</i> .....	108 -
3.2.4.4	<i>Índice de aridez espacial</i> .....	111 -
3.2.4.5	<i>Mapa de suelos</i> .....	112 -
3.2.4.6	<i>Geología regional</i> .....	115 -

#### **IV RESULTADOS .....** - 118 -

<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES DE PAISAJE .....</b>	<b>118 -</b>
4.1.1	Mapa de unidades de paisaje .....	119 -
4.1.2	Leyenda de unidades de paisaje .....	120 -
<b>4.2</b>	<b>FACTORES ABIÓTICOS .....</b>	<b>121 -</b>
4.2.1	Suelos .....	121 -
4.2.2	Temperatura y precipitación .....	122 -
4.2.3	Vientos .....	124 -
4.2.4	Topografía y pendiente .....	128 -
4.2.5	Humedad del suelo .....	129 -
<b>4.3</b>	<b>FACTORES BIÓTICOS .....</b>	<b>132 -</b>
4.3.1	Comunidades vegetales .....	132 -
<b>4.4</b>	<b>FACTORES ANTRÓPICOS .....</b>	<b>140 -</b>
4.4.1	Ganadería .....	140 -
4.4.2	Dispersión .....	141 -
4.4.3	Construcciones, caminos y cuerpos de agua .....	143 -
4.4.4	Modelo de asentamiento y evolución de la población .....	146 -

<b>4.5 DETERMINACIÓN DE DISTANCIAS ENTRE PARCHES, FRAGMENTACION Y COMPOSICION.....</b>	<b>149 -</b>
4.5.1 Asociación y composición de la vegetación .....	153 -
<b>4.6 DINÁMICA DE NUTRIENTES EN EL SUELO .....</b>	<b>157 -</b>
<b>4.7 RELACION DE VARIABLES .....</b>	<b>163 -</b>
4.7.1 Unidades de paisaje y formaciones vegetales .....	163 -
4.7.2 Fragmentación, presión antrópica y de los animales .....	165 -
4.7.3 Rugosidad topográfica y perfil del viento .....	167 -
4.7.4 Humedad topográfica e Islas de fertilidad .....	172 -
4.7.5 Interacción de factores .....	175 -
<b><i>V DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</i></b>	<b>178</b>
<b>5.1 DISCUSIÓN.....</b>	<b>178</b>
<b>5,2 CONCLUSIONES.....</b>	<b>181</b>
5.2.1 Conclusiones del objetivo general .....	181
5.2.2 Conclusiones de los objetivos específicos .....	181
<b>5.3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>183</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>192</b>



## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama (a) el cambio fásico durante el ciclo de vida de una hayedo de la misma edad (b) la distribución en el espacio de las fases de una hayedo más viejo. Tomado de: (Watt, 1947) .....	- 25 -
<b>Figura 2.</b> Patrón de vegetación Tigre (A) Somalia (7°46'51.15"N, 47°55'38.56"E) y Patrón de vegetación Leopardo (B) La Guajira (12° 8'6.54"N, 72° 7'25.92"O). Space imaging - Google Earth: Elaboración propia.....	- 26 -
<b>Figura 3.</b> Patrones de la vegetación en zonas áridas: Bandas de vegetación patrón de 'Tigre' (A) y Bandas de vegetación patrón 'Leopardo' (B). Tomado de: (Aguiar, 1999) .....	- 27 -
<b>Figura 4.</b> Patrones de vegetación en Somalia. Tomado de: (Macfadyen, 1950). .....	- 27 -
<b>Figura 5.</b> Patrones de vegetación en Nigeria, según precipitación anual y pendiente. Tomado de: (Valentin et al., 1999).....	- 30 -
<b>Figura 6.</b> Modelo numérico, vegetación en función de la precipitación. Tomado de: (Gavan et al., 2012).....	- 33 -
<b>Figura 7.</b> Modelo propuesto de patrón leopardo de la Patagonia, representa dos fases de sucesiones cíclicas donde los arbustos facilitan el establecimiento de las gramíneas. Tomado de: (Sala et al., 1996).....	- 33 -
<b>Figura 8.</b> Modelo de los patrones de vegetación periódica. Tomado de: (Deblauwe et al., 2008) .....	- 34 -
<b>Figura 10.</b> Diagrama general de la estructura de tesis .....	- 36 -
<b>Figura 10.</b> Ubicación de la península de la Guajira (Ver mapa en Anexo 1). .....	- 37 -
<b>Figura 11.</b> Ubicación del área de estudio en la península de la Guajira. (Ver mapa en Anexo 2) ..	- 39 -
<b>Figura 11.</b> Carta de Juan de la Cosa del año 1500. ....	- 41 -
<b>Figura 12.</b> Mapa de la 'Terra Nova' Waldseemüller del año 1513.....	- 42 -
<b>Figura 13.</b> Mapa de la Guajira por Joseph Xavier de Pestaña, 1753. ....	- 42 -
<b>Figura 14.</b> Carta de la provincia de La Hacha; por Juan López 1786. ....	- 43 -
<b>Figura 15.</b> Península de la Guajira estados unidos de Colombia; por F.A.A. Simons 1885... -	- 43 -
<b>Figura 17.</b> Índice de aridez de la UNESCO 1979.....	- 47 -
<b>Figura 18.</b> Índice de aridez de De Martonne 1926.....	- 48 -
<b>Figura 19.</b> Mapa de la distribución de las tierras áridas no polares Meigs 1953, tomado de (Maliva, 2012). ....	- 49 -
<b>Figura 20.</b> Tipos de desarrollo evolutivo tomado de: (Allaby, 2008).....	- 56 -
<b>Figura 21.</b> Sistema de clasificación fisiográfica y sus categorías (Villota, 1997) .....	- 59 -
<b>Figura 22.</b> El enfoque operacional de Geomorfometría (Hengl et al., 2009). .....	- 63 -
<b>Figura 23.</b> Grado de variación en la posición de la pendiente (Jenness, 2006).....	- 64 -
<b>Figura 24.</b> Valores TPI calculados utilizando dos diferentes vecinos (Jenness, 2006). .....	- 64 -
<b>Figura 25.</b> Clasificación de la posición de la pendiente (Jenness, 2006).....	- 65 -
<b>Figura 26.</b> Diferencias entre un DSM y un DTM. (Modificado de Linder, 2009). .....	- 66 -
<b>Figura 19.</b> Formula de rugosidad (Lettau, 1969).....	- 67 -
<b>Figura 28.</b> Metodología general del trabajo. ....	- 70 -
<b>Figura 29.</b> Artículo presentado en el boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles (Anexos). .....	- 71 -

<b>Figura 30.</b> Patrones espaciales tipo Leopardo (izq) la Guajira, Colombia 2013 (12° 9'36.17"n - 72° 7'44.64"o) (der) Almería, España 2010 (36°52'52.26"n - 2°20'39.02"o). Fuente: EROS-B Imagesat internacional, Ortofoto PNOA, IGN .....	- 73 -
<b>Figura 31.</b> Puntos de presencia de patrones leopardo alrededor del mundo, tomados desde referencias bibliográficas e información de campo.....	- 73 -
<b>Figura 32.</b> Modelo de distribución potencial del patrón espacial tipo Leopardo.....	- 76 -
<b>Figura 33.</b> Especies identificadas en campo (izq) Guajira, Colombia (12°24'31.34"n - 71°43'59.63"o) (der) Murcia, España (37°36'18.62"n - 0°43'43.55"o) .....	- 77 -
<b>Figura 34.</b> Muestras de algunos lugares con presencia del patrón leopardo alrededor del mundo, identificados con el modelo de distribución potencial.....	- 79 -
<b>Figura 35.</b> Distribución del Patrón Leopardo en Colombia 2012.....	- 80 -
<b>Figura 36.</b> Muestras del patrón Leopardo en el área de estudio satélite Corona en 1965. ....	- 81 -
<b>Figura 37.</b> Muestras del patrón Leopardo en el área de estudio satélite QuickBird en 2007.-	81 -
<b>Figura 38.</b> Muestras del patrón Leopardo en el área de estudio satélite Eros B en 2013.....	- 81 -
<b>Figura 39.</b> Imagen de satélite QuickBird 2007 del Cabo de la Vela. ....	- 83 -
<b>Figura 40.</b> Imágenes estereoscópicas(A izq. B der.) de satélite Eros B 2013 del Cabo de la Vela. .	84 -
<b>Figura 41.</b> Imágenes estereoscópicas(A sup. B inf) del satélite Corona KH-4B 1965 del Cabo de la Vela.....	- 85 -
<b>Figura 42.</b> Estaciones meteorológicas sin falta de información en la Alta Guajira.....	- 86 -
<b>Figura 43.</b> Estacion de medición de viento en la Guajira (A) Parque eólico Jepíachi (B). ....	- 87 -
<b>Figura 44.</b> GPS Trimble Juno (A) y GPS Thales Mobile Mapper (B).....	- 88 -
<b>Figura 45.</b> Anemómetro MASTECH en salida de campo.....	- 88 -
<b>Figura 46.</b> Barrena de suelo Hoffer en salida de campo.....	- 88 -
<b>Figura 47.</b> Kit para evaluación de macronutrientes (pH,N,P,K) LaMotte.....	- 89 -
<b>Figura 48.</b> Medidor de humedad del suelo en salida de campo.....	- 89 -
<b>Figura 49.</b> Cámara Sony DSC-HX200V.....	- 90 -
<b>Figura 50.</b> Muestreo sistemático para salida de campo. ....	- 92 -
<b>Figura 51.</b> Puntos salida de campo zona costera de la península de la Guajira durante el año 2012.....	- 93 -
<b>Figura 52.</b> Primera pruebas del patrón leopardo (A) Castela erecta (B) Heterostachys ritteriana -	93 -
<b>Figura 53.</b> Área de trabajo parte baja del Cabo de la Vela en la Alta Guajira.....	- 94 -
<b>Figura 54.</b> Puntos GCP (rojo) y Tie Points (Azul) sobre las imágenes estéreo A y B. ....	- 97 -
<b>Figura 55.</b> Modelo de superficie DSM a 2 metros (A) Zona plana (B) zona de montaña (Serranía) (Ver mapa en Anexo 4).....	- 98 -
<b>Figura 56.</b> Modelo de terreno DTM en 3D donde se aprecia parte de la serranía de carpintero. -	99 -
<b>Figura 57.</b> Imágenes orthorectificadas QuickBird (A) EROS B (B) Corona (C) en perspectiva 3D. .	102 -
<b>Figura 58.</b> Interfaz del proceso de segmentación en el programa ENVI.....	- 103 -
<b>Figura 59.</b> Interfaz creación de reglas en el programa ENVI.....	- 103 -
<b>Figura 60.</b> Mapa resultante de cobertura y capas de uso del suelo para 1965 (Ver mapa en Anexo 3). ....	- 104 -

<b>Figura 61.</b> Mapa resultante de cobertura y capas de uso del suelo para 2007(Ver mapa en Anexo 4). .....	- 104 -
<b>Figura 62.</b> Mapa resultante de cobertura y capas de uso del suelo para 2013(Ver mapa en Anexo 5). .....	- 105 -
<b>Figura 63.</b> Modelos TPI para cálculos de media focal. ....	- 106 -
<b>Figura 64.</b> Mapa resultante TPI (Ver mapa en Anexo 6). ....	- 107 -
<b>Figura 65.</b> Modelo de sombras combinado con dirección de pendiente. ....	- 108 -
<b>Figura 66.</b> Mapa geomorfológico de Cabo de la Vela 1:100.000 INVEMAR 2007. ....	- 108 -
<b>Figura 67.</b> Mapa geomorfológico de área de estudio (Ver mapa en Anexo 7). ....	- 110 -
<b>Figura 68.</b> Mapa de La Temperatura Media Mensual 2012. ....	- 111 -
<b>Figura 69.</b> Mapa de La Precipitación Media Mensual 2012. ....	- 111 -
<b>Figura 70.</b> Mapa Índice de aridez De Martonne del área de estudio. ....	- 112 -
<b>Figura 71.</b> Hoja 5 Mapa de suelos 1:100.000. ....	- 112 -
<b>Figura 72.</b> Corte del area de estudio sobre la Hoja 5 del mapa de suelos 1:100.000. ....	- 113 -
<b>Figura 73.</b> Mapa ajustado de suelos (Ver mapa en Anexo 8). ....	- 115 -
<b>Figura 74.</b> Plancha geológica número 5. 1:100.000 de la Guajira. ....	- 116 -
<b>Figura 75.</b> Mapa geológico ajustado para el área de estudio (Ver mapa en Anexo 9). ....	- 116 -
<b>Figura 76.</b> Mapa de unidades fisiográficas de paisaje del área de estudio (Ver mapa en Anexo 10). ....	- 119 -
<b>Figura 77.</b> Perfil topográfico que muestra la relación de sedimentos, suelo y geoforma. ....	- 121 -
<b>Figura 78.</b> Taxonomía de suelos según la clasificación USDA en el área de estudio. ....	- 122 -
<b>Figura 79.</b> Estación climatología utilizada para caracterizar el área de estudio. ....	- 122 -
<b>Figura 80.</b> Gráfico de temperatura promedio en el periodo 1986 - 2013. ....	- 123 -
<b>Figura 81.</b> Gráfico de precipitación promedio en el periodo 1986 - 2013. ....	- 123 -
<b>Figura 82.</b> Climograma del área cercana (Puerto Bolívar) a la zona de estudio 1986 - 2013. ....	- 124 -
<b>Figura 83.</b> Ubicación de estaciones de vientos alrededor de la península .....	- 125 -
<b>Figura 84.</b> Interpolación IDW velocidad promedio del viento en 2012. ....	- 125 -
<b>Figura 85.</b> Interpolación IDW dirección promedio del viento en 2012. ....	- 126 -
<b>Figura 86.</b> Velocidad y dirección promedio del viento en 2012. ....	- 126 -
<b>Figura 87.</b> Rosa de los vientos en 2012 para el área de estudio. ....	- 127 -
<b>Figura 88.</b> Topografía (modelo de elevación) del área de estudio (Ver mapa en Anexo 12). ....	- 128 -
<b>Figura 89.</b> Modelo de pendientes (Ver mapa en Anexo13). ....	- 129 -
<b>Figura 90.</b> Modelo de humedad topográfica (Ver mapa en Anexo 14). ....	- 129 -
<b>Figura 91.</b> Puntos de estaciones en campo. ....	- 130 -
<b>Figura 92.</b> Distribución del error interpolación kriging de humedad. ....	- 130 -
<b>Figura 93.</b> Distribución del error mapa de humedad. ....	- 131 -
<b>Figura 94.</b> Mapa resultado de la interpolación kriging de humedad en el suelo. ....	- 131 -
<b>Figura 95.</b> Castela erecta en la zona d estudio. ....	- 132 -
<b>Figura 96.</b> Prosopis juliflora en la zona de estudio. ....	- 133 -
<b>Figura 97.</b> Parkinsonia praecox en la zona de estudio. ....	- 134 -
<b>Figura 98.</b> Melocactus curvispinus en la zona de estudio. ....	- 134 -
<b>Figura 99.</b> Opuntia caracasana en la zona de estudio. ....	- 135 -
<b>Figura 100.</b> Stenocereus griseus en la zona de estudio. ....	- 136 -

<b>Figura 101.</b> Pilosocereus lanuginosus en la zona de estudio.....	- 136 -
<b>Figura 102.</b> Portulaca halimoides en la zona de estudio. ....	- 137 -
<b>Figura 103.</b> Heterostachys ritteriana en la zona de estudio. ....	- 138 -
<b>Figura 104.</b> Sesuvium portulacastrum en la zona de estudio. ....	- 139 -
<b>Figura 105.</b> Jatropha gossypifolia en la zona de estudio. ....	- 139 -
<b>Figura 106.</b> Evolución del número de animales en la zona de estudio.....	- 141 -
<b>Figura 107.</b> Área de influencia dispersión de los animales en la zona de estudio.....	- 142 -
<b>Figura 108.</b> Presencia de cabras y ovejas en distintas partes del paisaje.....	- 142 -
<b>Figura 109.</b> Ejemplo información digitalizada del uso del suelo en las distintas imágenes y años. .....	- 143 -
<b>Figura 110.</b> Mapa de uso del suelo 1965. ....	- 144 -
<b>Figura 111.</b> Mapa de uso del suelo 2007. ....	- 144 -
<b>Figura 112.</b> Mapa de uso del suelo 2013. ....	- 145 -
<b>Figura 113.</b> Grafico evolución área que ocupa los caminos y rancherías 1965,2007, 2013. -	145 -
<b>Figura 114.</b> Grafico evolución área que ocupa el jaguey y los corrales 1965,2007, 2013. -	146 -
<b>Figura 115.</b> Grafico evolución del número de rancherías y corrales 1965,2007, 2013. ....	- 146 -
<b>Figura 116.</b> Ejemplo de cómo ha evolucionado una parte del área de estudio de 1965,2007, 2013.....	- 147 -
<b>Figura 117.</b> Evolución de la población en el área de estudio.....	- 148 -
<b>Figura 118.</b> Ejemplo de las medidas de la distancia entre parches Leopardo sobre el terreno. ....	149 -
<b>Figura 119.</b> Área total de la cobertura (CA) para los distintos años. ....	- 150 -
<b>Figura 120.</b> Número de Parches (NP) para los distintos años.....	- 151 -
<b>Figura 121.</b> Área promedio del parche (AREA_MN) para los distintos años. ....	- 151 -
<b>Figura 122.</b> Promedio de distancia euclidiana (ENN_MN) para los distintos años.....	- 152 -
<b>Figura 123.</b> Perfil asociación Heterostachys ritteriana - Sesuvium portulacastrum.....	- 153 -
<b>Figura 124.</b> Asociación Heterostachys ritteriana - Sesuvium portulacastrum en suelos árenos... -	154 -
<b>Figura 125.</b> Perfil asociación Castela erecta - Prosopis juliflora - Opuntia caracasanan. ....	- 154 -
<b>Figura 126.</b> Asociación Castela erecta - Prosopis juliflora - Opuntia caracasanan en suelos árenos – rocosos. ....	- 155 -
<b>Figura 127.</b> Perfil asociación Castela erecta - Stenocereus griseus - Pilosocereus lanuginosus.... -	155 -
<b>Figura 128.</b> Asociación Castela erecta - Stenocereus griseus - Pilosocereus lanuginosus en suelos rocosos.....	- 156 -
<b>Figura 129.</b> Toma de muestras (In -Off) en la vegetación y el suelo desnudo.....	- 157 -
<b>Figura 130.</b> Transecto y estaciones para evaluar la variabilidad de nutrientes.....	- 157 -
<b>Figura 131.</b> Muestras del pH sobre las estaciones en el transecto.....	- 158 -
<b>Figura 132.</b> Muestras del nitrógeno sobre las estaciones en el transecto. ....	- 159 -
<b>Figura 133.</b> Evidencia de excrementos cerca de la estación 2 del transecto. ....	- 159 -
<b>Figura 134.</b> Muestras del fosforo sobre las estaciones en el transecto. ....	- 160 -
<b>Figura 135.</b> Muestras del potasio sobre las estaciones en el transecto. ....	- 161 -
<b>Figura 136.</b> Muestras de humedad sobre las estaciones en el transecto.....	- 161 -
<b>Figura 137.</b> Muestras de humedad dentro de la vegetación.....	- 162 -

<b>Figura 138.</b> Vista en 3d unidades fisiográficas de paisaje donde se encuentra el patrón Leopardo. ....	- 163 -
<b>Figura 139.</b> Perfil del área de estudio que muestra las relaciones sobre el paisaje que conforman el patrón Leopardo. ....	- 164 -
<b>Figura 140.</b> Evolución de la fragmentación de la cobertura en el área 1965, 2007, 2013. ...	- 165 -
<b>Figura 141.</b> Mapa de caminos combinados 1965, 2007, 2013 (Ver mapa en Anexo 15). ....	- 166 -
<b>Figura 142.</b> Efecto de las pisadas de los animales (izq) y efectos de las huellas de vehículos (Der). ....	- 167 -
<b>Figura 143.</b> Mapa de rugosidad en la zona de estudio (Ver mapa en Anexo 16). ....	- 168 -
<b>Figura 144.</b> Cálculo del perfil logarítmico de la velocidad del viento en el área. ....	- 168 -
<b>Figura 145.</b> Mapa cizalladura del viento a nivel topográfico. ....	- 169 -
<b>Figura 146.</b> Distribución del error interpolación kriging de viento a nivel del suelo. ....	- 170 -
<b>Figura 147.</b> Mapa del error interpolación kriging de viento a nivel del suelo. ....	- 170 -
<b>Figura 148.</b> Mapa viento a nivel del suelo. ....	- 171 -
<b>Figura 149.</b> Ejemplo de medida de viento a nivel del suelo dentro de la vegetación sobre la llanura costera (4.51m/s). ....	- 171 -
<b>Figura 150.</b> Mapa que relaciona el índice de humedad topográfica y la cobertura presente en, 2013. ....	- 172 -
<b>Figura 151.</b> Esquema de formación de una micro isla de fertilidad. ....	- 173 -
<b>Figura 152.</b> Vegetación con formación de isla de fertilidad individual. ....	- 173 -
<b>Figura 153.</b> Esquema de la formación de una macro isla de fertilidad. ....	- 174 -
<b>Figura 154.</b> Vegetación con formación de isla de fertilidad grupal. ....	- 174 -
<b>Figura 155.</b> Efecto de la isla de fertilidad y la humedad topográfica. ....	- 175 -
<b>Figura 156.</b> Esquema de la formación del patrón Leopardo en la Guajira. ....	- 176 -

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Datos de presencia del patrón Tigre en referencias bibliográficas.....	- 28 -
<b>Tabla 2.</b> Datos de presencia del patrón Leopardo en referencias bibliográficas.....	- 31 -
<b>Tabla 3.</b> Datos de simulación de patrones en referencias bibliográficas .....	- 32 -
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de la aridez UNESCO 1979.....	- 48 -
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de la aridez De Martonne 1926.....	- 48 -
<b>Tabla 8.</b> Sistema taxonómico de las geoformas (Zinck, 1988).....	- 58 -
<b>Tabla 6.</b> Escala de Beaufort de la fuerza de los vientos.....	- 66 -
<b>Tabla 7.</b> Clases de rugosidad (Wiernga, 1993).....	- 68 -
<b>Tabla 9.</b> Datos de presencia del patrón Leopardo tomados de referencias bibliográficas. ...	- 72 -
<b>Tabla 10.</b> Datos de presencia del patrón leopardo tomados de referencias bibliográficas. ...	- 72 -
<b>Tabla 11.</b> Información cartográfica general utilizada en el trabajo.....	- 82 -
<b>Tabla 12.</b> Metadatos imagen de satélite QuickBird 2007/03/15.....	- 83 -
<b>Tabla 13.</b> Metadatos Estéreo imágenes del satélite Eros B 2013/02/06.....	- 84 -
<b>Tabla 15.</b> Metadatos Estéreo imágenes del satélite Corona KH-4B, 1965. ....	- 85 -
<b>Tabla 15.</b> Ejemplo de datos meteorológicos de temperatura media mensual 2013 IDEAM. -	86 -
<b>Tabla 16.</b> Ejemplo de datos meteorológicos de velocidad media mensual del viento (m/seg) (EPM, 2012).....	- 87 -
<b>Tabla 17.</b> Escalas en relación con áreas y distancias en el terreno, área legible en papel y numero de observaciones en campo. ....	- 91 -
<b>Tabla 18.</b> Valores de error resultantes en las imágenes E2376518 y E2376519 .....	- 97 -
<b>Tabla 19.</b> Error máximo esperado según variación de escala (tomado de Fallas, 2002).....	- 99 -
<b>Tabla 20.</b> Clases utilizadas para clasificar las coberturas vegetales. ....	- 100 -
<b>Tabla 21.</b> Clases utilizadas para clasificar los usos del suelo. ....	- 100 -
<b>Tabla 22.</b> Clases geomorfológicas identificadas en salida de campo. ....	- 109 -
<b>Tabla 23.</b> Tipos de suelos en relación con la geomorfología local.....	- 113 -
<b>Tabla 24.</b> Codificación de unidades de paisaje. ....	- 118 -
<b>Tabla 25.</b> Leyenda de unidades fisiográficas de paisaje (Ver en Anexo 11). ....	- 120 -
<b>Tabla 26.</b> Animales presentes en al área de estudio a través de los años.....	- 140 -
<b>Tabla 27.</b> Población del área de estudio a través de los distintos censos y proyecciones. ...	- 148 -
<b>Tabla 28.</b> Índices utilizados. ....	- 149 -
<b>Tabla 29.</b> Área total de la cobertura (CA) para los distintos años. ....	- 150 -
<b>Tabla 30.</b> Número de Parches (NP) para los distintos años. ....	- 150 -
<b>Tabla 31.</b> Área promedio del parche (AREA_MN) para los distintos años. ....	- 151 -
<b>Tabla 32.</b> Promedio de distancia euclidiana (ENN_MN) para los distintos años.....	- 152 -
<b>Tabla 33.</b> Resultado transecto de estaciones de macronutrientes pH y humedad. ....	- 158 -
<b>Tabla 34.</b> Leyenda de unidades fisiográficas de paisaje donde se encuentra el patrón Leopardo. .....	- 163 -
<b>Tabla 35.</b> Clasificación de rugosidad de terrenos Tomado de (Wieringa, 1993) .....	- 167 -



# PARTE I

---



*Atardecer en el Cabo de la Vela península de la Guajira*

## CAPÍTULO 1 (INTRODUCCIÓN)

---



# I. INTRODUCCION

---

Identificar los patrones espaciales y temporales de la distribución de los seres vivos sobre el planeta ha sido desde sus inicios el centro del estudio de la biogeografía (Pliscoff, 2011). Los estudios biogeográficos son relevantes para el conocimiento y conservación de la diversidad biológica, ya que permiten conocer la distribución y caracterización original y actual de la biota, además de brindar herramientas para su protección y manejo. Igualmente, la biogeografía contribuye a comprender patrones evolutivos, espaciales, composicionales, usos del suelo, entre otros (Hernández, 1992). Colombia, un país Ecuatorial-intertropical, posee una localización privilegiada con una alta variabilidad climática, hidrogeológica, biogeográfica y étnica; siendo el segundo país con más biodiversidad solo superado por Brasil. En el mundo las tierras secas cubren aproximadamente el 41% de la superficie terrestre y más de 2000 millones de personas (alrededor del 35% de la población mundial) habitan en ellas (ME Assessment, 2005). En Colombia se calcula que el 16.9% del país presenta este estado (MinAmbiente, 2001). En particular, el departamento de la Guajira, ubicado en la parte más septentrional de Colombia y a su vez de todo el continente Suramericano, es parte del Caribe, por lo cual sus paisajes áridos son clasificados dentro de las provincias biogeográficas del país como cinturón árido pericaribeño, en donde la vegetación seca se constituye por árboles pequeños, arbustos achaparrados de hojas perennes, rígidas y plantas espinosas. También se presentan gramíneas que se secan en épocas sin precipitaciones. La vegetación de la zona seca del Caribe Colombiano se originó principalmente de la vegetación seca de Centroamérica, sin embargo, presenta afinidades con formaciones áridas suramericanas, especialmente con la región de Catingas en Brasil y en menor grado con las zonas secas de la costa norte del Perú y costa del Ecuador (Sarmiento, 1975). Se encuentra habitada primordialmente por comunidades indígenas que han tenido la habilidad de adaptarse al inhóspito entorno donde se asentaron desde aproximadamente 5000 años atrás. El clima en la península de la Guajira se caracteriza por la ausencia de estaciones térmicas, fuertes vientos, precipitación irregular a lo largo del año y temperaturas que pueden llegar a niveles extremos entre 28° y 33°C (IDEAM, 2005).

En este sentido la vegetación, presente en la península es mayoritariamente xerófita y halófita, en particular para resistir factores climáticos extremos teniendo suelos poco fértiles sometidos a una actividad eólica constante. En la última década distintos autores (Aguiar, 1999; Rietkerk, 2008; Cheng et al., 2010) apoyan la idea de que en los ecosistemas que están fuertemente limitados por el agua, la vegetación no es continua y se organiza de manera homogénea en dos fases, compuesta por parches con cobertura vegetal alta intercalada con una de tipo bajo o sin cobertura. Las referencias a estudios de la distribución irregular de algunas coberturas vegetales comenzaron a finales de 1950, cuando Greig-Smith (1979) estudió los patrones de distribución de la población de plantas en África. Watt (1947) propuso un modelo para la dinámica de los parches que fue un hito en la ecología de comunidades vegetales, ya que evidenció la presencia de regiones mesófilas, proponiendo que las comunidades de plantas estaban compuestas de diferentes tipos de parches, cada uno en una etapa de sucesión diferente. Desde entonces, se han realizado muchos estudios de la dinámica de parches en bosques mesófilos y praderas. Sin embargo, los estudios de síntesis de la dinámica de parches en ambientes áridos y semiáridos han sido relativamente escasos (Aguiar, 1999). En las áreas áridas y semi áridas del mundo (Meigg, 1953) durante los últimos 50 años, se ha evidenciado la presencia de patrones espaciales a escala regional y local, en el que la vegetación forma patrones regulares (Slatyer, 1959; Warren, 1973; Worrall, 1959), estos pueden ser observados especialmente desde sensores remotos montados sobre plataformas satelitales o aerotransportadas. El avance en las tecnologías de percepción remota a significado que el mapeo y monitoreo mediante imágenes de satélite es ahora factible y rentable (White, 2011).

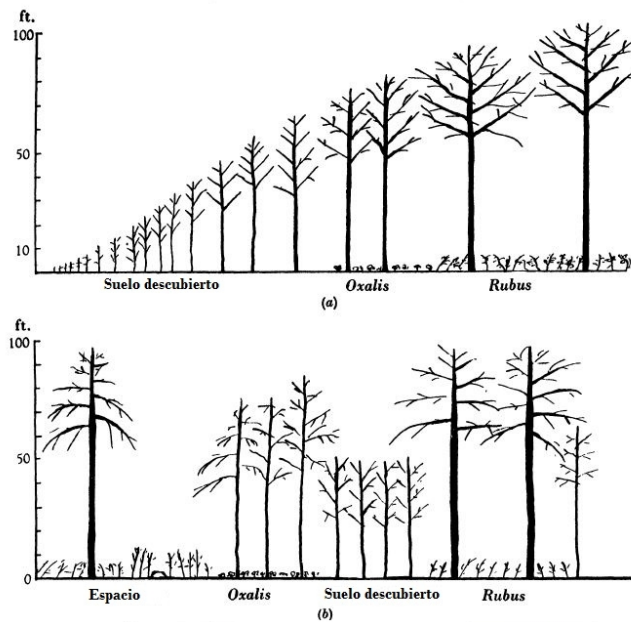
Con el constante y mayor aumento de la cobertura y resolución espacial de la información cartográfica, se ha podido vislumbrar con más detalle a un nivel global la presencia de estos comportamientos en la distribución de la vegetación, los patrones consisten principalmente en una matriz heterogénea de cobertura vegetal baja que aparentemente ha sido desestabilizada con la consecuente ruptura del sistema matricial, ésta cubierta vegetal subsecuente revela zonas de suelos desnudos o claros de tierra y zonas con vegetación espaciada de manera regular, generalmente de porte bajo o intercalada con porte un poco más alto de vegetación, las áreas son homogéneas en su composición desde el punto de vista de suelos, vegetación y clima circundante. Dentro de la zonas con vegetación se puede presumir una mayor capacidad de desarrollo de las plantas por el fenómeno de isla de fertilidad, isla fértil o parches fértiles (Schlesinger, 1990; García, 1970), así como, la influencia de la teoría de islas; respecto al equilibrio y dinamismo (MacArthur, 1967) de los vegetales presentes en los parches, en el cual los lugares donde se sitúa la vegetación tienen una mayor cantidad de nutrientes dentro del suelo y disponibilidad de humedad, facilitando el desarrollo en estos espacios en contra posición a los lugares donde hay ausencia de la vegetación.

En algunos ecosistemas, los parches densos forman bandas o rayas y las comunidades que presentan este patrón se denominan genéricamente como bandas o "patrón Tigre". En otros ecosistemas, los parches de vegetación densa son irregulares en forma siguiendo la analogía anterior, aquí se conocen como manchas de vegetación o "patrón Leopardo" (Aguiar, 1999). El patrón denominado Tigre (Tiger Bush) se caracteriza por tener parches de vegetación que forman bandas o rayas intercaladas con espacios de suelo desnudo o con poca cobertura vegetal, estos pueden ir desde los 30 a los 400 metros de largo y desde los 10 a los 50 metros de ancho. El patrón Leopardo (Leopard Bush) se caracteriza por parches de vegetación en forma de manchas o espacios de vegetación intercaladas con espacios de suelo desnudo, sus dimensiones pueden ser desde 1 metro a los 10 metros de largo teniendo anchos en formas variables desde los 2 a 50 metros.

Aunque el patrón Tigre ha sido más ampliamente estudiado en las regiones semiáridas de África, Asia, Australia y Norte América, al realizar una comparación de los estudios en dinámica de los patrones Leopardo, este es el menos estudiado. En donde la mayor parte de los estudios en la bibliografía se han centrado en el caso de las franjas o rayas conocidas como Tiger Bush por su nombre en inglés, muy pocos han sido los estudios que abordan el patrón de manchas o espacios de vegetación denominado Leopard Bush, gran parte de los análisis de patrones espacio-temporales ha sido a través de simulaciones numéricas (Borgogno, 2009), existe un modelo de distribución mundial de patrones periódicos de la vegetación en zonas áridas y semi áridas en el cual intentan aislar la causalidad de todos los patrones en conjunto no haciendo distinción entre ellos y a una escala global poco detallada (Deblauwe et al., 2008). A causa de la poca investigación y análisis experimentales en este campo, todavía se desconocen los procesos que controlan la formación y el desarrollo específico del patrón Leopardo. Como hipótesis se plantea que la distribución y composición del patrón Leopardo en la península de la Guajira es originada por la interacción entre los aspectos antrópicos y con los aspectos ambientales tales como el viento, el agua, la geomorfología y la biología; siendo esta interacción la que produce en ciertas partes del paisaje la acumulación de nutrientes en el suelo donde se desarrollan las formaciones vegetales. Para vislumbrar su distribución se determinó las relaciones directas de variables ambientales con la aparición y comportamiento específicamente de patrones tipo Leopardo en las zonas áridas y semi áridas, tomando como base información real de campo de dos partes del mundo (España y Colombia) y referencias de información bibliográfica, así como, predictores de variables ambientales a escala global, en conjunto con un modelo matemático empírico para realizar un modelo mundial del patrón.

## 1.1 ANTECEDENTES

Los primeros estudios en los que se comenzó a tener referencias de la dinámica de parches en las comunidades vegetales se remontan a Watt (1947), el cual formuló un modelo para la dinámica de los parches en la ecología de comunidades, proponiendo que las comunidades de plantas estaban compuestas de diferentes tipos de parches, cada uno en una etapa de sucesión diferente de los individuos y de las especies que lo conforman; estos parches forman un mosaico y en conjunto constituyen la comunidad. Mostrando que las fases (Figura 1) están relacionadas dinámicamente entre sí en un patrón. En cualquier lugar dado hay un ciclo que consiste en una serie de actualización de fases en las que hay un cambio continuo en la estructura ecológica, asociado con el cambio de la edad, la tasa de crecimiento y la densidad de los árboles dominantes; correlacionado con los cambios en la capa de suelo, plantas moribundas, muertas, pudrición de tallos y los espacios en la vegetación (Watt, 1947).



**Figura 1.** Diagrama (a) el cambio fásico durante el ciclo de vida de una hayedo de la misma edad (b) la distribución en el espacio de las fases de una hayedo más viejo. Tomado de: (Watt, 1947)

Las referencias a la distribución irregular o heterogeneidad espacial de la vegetación tuvieron sus primeros avances cuando Greig-Smith (1979), estudió los patrones de distribución de la población de plantas en África. La interacción entre las plantas puede resultar en la heterogeneidad espacial, en particular donde la vegetación incluye especies de muy diferente tamaño o forma de vida. Cada planta individual modifica su hábitat inmediato en una mayor o menor medida, de modo que un árbol o arbusto a un cierto grado determinará un hábitat disponible para especies herbáceas. Si el efecto es disminuir o aumentar la abundancia de otras especies, si la propia especie 'dominante' muestra un patrón, entonces ese patrón se impondrá sobre otras especies. Incluso si no lo hace, las subordinadas de menor tamaño se impondrán el patrón. Si la especie 'dominante' es capaz de una propagación vegetativa, puede imponer el patrón incluso en otras especies de tamaño comparable. Estos efectos son evidentes cuando existe diferencia bruta de estatura entre las especies en cuestión o en el vigor de la propagación vegetativa (por ejemplo, la formación de grandes manchas de helechos, *Pteridium aquilinum*), pero interacciones similares a una escala mucho más fina pueden ser demostradas (Greig-Smith, 1979). Desde entonces, se han realizado muchos estudios de la dinámica de parches en bosques mesófilos y praderas. Sin embargo, los estudios de síntesis de la dinámica de parches en ambientes áridos y semiáridos han sido relativamente escasos (Aguar, 1999). En las últimas dos

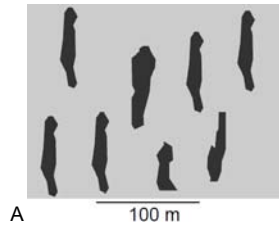
décadas diversos autores (Aguiar, 1999; Valentin et al., 1999; d'Herbes et al., 2001; Deblauwe et al., 2008; Rietker, 2008; Cheng et al., 2010; Meron, 2012) apoyan la idea de que los ecosistemas que están restringidos por la precipitación, la vegetación no es continua y se organiza de manera heterogénea en dos fases, compuesta por parches con cobertura vegetal alta intercalada con una de tipo bajo o sin cobertura, en dos patrones típicos (Figura 2).



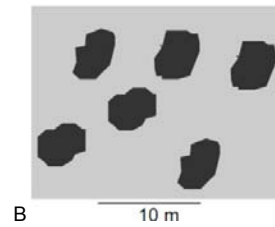
**Figura 2.** Patrón de vegetación Tigre (A) Somalia ( $7^{\circ}46'51.15''N$ ,  $47^{\circ}55'38.56''E$ ) y Patrón de vegetación Leopardo (B) La Guajira ( $12^{\circ} 8'6.54''N$ ,  $72^{\circ} 7'25.92''O$ ). Space imaging - Google Earth: Elaboración propia.

La cobertura vegetal en los ecosistemas que están fuertemente limitados de agua no es continua y es por lo general inferior al 60%. Los patrones de vegetación en ecosistemas áridos se caracterizan por tener un tamaño, forma y una distribución espacial en los parches de cobertura vegetal alta, mientras que los parches de cobertura vegetal baja son considerados la matriz en la que los parches densos se distribuyen. Por otro lado, en algunos ecosistemas, las manchas densas de cobertura forman bandas o rayas, y las comunidades que presentan este patrón se denominan de forma genérica como bandas o vegetación Tigre (Tiger Bush). En otros ecosistemas, los parches de vegetación densa son irregulares en forma, siendo conocidos como manchas o vegetación Leopardo (Leopard Bush) (Aguiar, 1999) (Figura 2 y 3).

Tigre - Vista aérea de un patrón de bandas

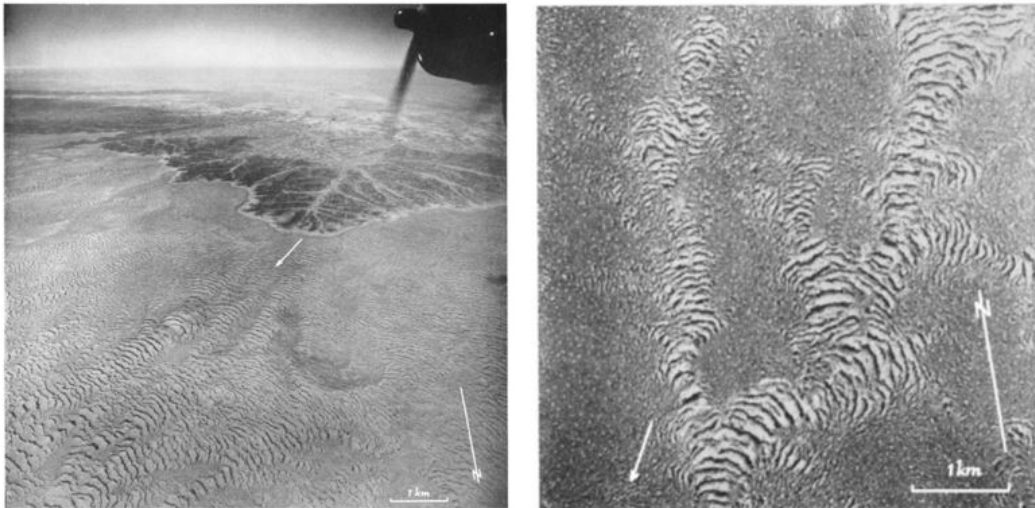


Leopardo - Vista aérea de un patrón de manchas



**Figura 3.** Patrones de la vegetación en zonas áridas: Bandas de vegetación patrón de 'Tigre' (A) y Bandas de vegetación patrón 'Leopardo' (B). Tomado de: (Aguiar, 1999)

Los primeros estudios en las áreas áridas y semiáridas del mundo (Meigg, 1953), en los que se ha evidenciado la presencia de patrones espaciales a escala regional y local, donde la vegetación forma patrones regulares, fueron desarrollados en el continente Africano y Australiano; (Macfadyen, 1950; Slatyer, 1959; Worrall, 1959; Boaler, 1962; Wickens, 1971;) estos pudieron ser observados en los primeros vuelos de fotografía aérea de zonas como Somalia, Sudan y Australia central. Los patrones inicialmente reportados fueron en las misiones de exploración de áreas remotas (Figura 4).



**Figura 4.** Patrones de vegetación en Somalia. Tomado de: (Macfadyen, 1950).

Durante una investigación geológica para suministro de agua llevada a cabo en 1947-48, se tuvo la oportunidad de estudiar un gran número de fotografías aéreas de dos zonas de semi-desierto, el Haud y Sawl Haud, llanuras de la Somalia Británica. Muchas mostraban una planta carente de interés apreciable, escasos arbustos de grueso crecimiento desordenado y sin aparente diseño, aunque las carreteras y caminos de vez en cuando mostraban líneas de vegetación más densa, debido sin duda a la escorrentía en canales. Otras fotografías muestran patrones rítmicos notables; "arcos de vegetación", como se han llamado, a primera vista recuerda a las marcas de olas producidas por el soplado de arena, pero a gran escala y más raramente "canales de agua", un sorprendente ejemplo de lo que se asemeja a múltiples campos de arado gigantes. En algunos lugares, los patrones son simples, pero en otros lugares los efectos de interferencia de los dos patrones están a la vista (Macfadyen, 1950). Al descubrimiento inicial de Macfadyen le siguieron diversos trabajos que han tratado de comprender el comportamiento y distribución del patrón Tigre desde los años 50 hasta el presente, enfocándose especialmente en zonas áridas y semiáridas de África (Tabla 1).

**Tabla 1.** Datos de presencia del patrón Tigre en referencias bibliográficas.

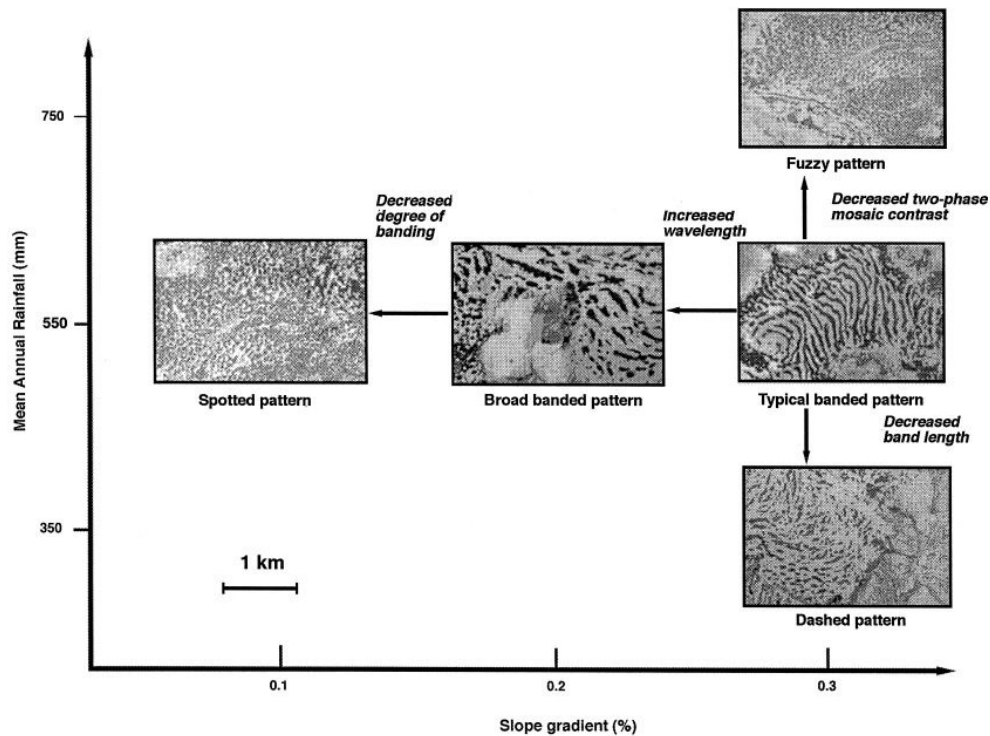
Lugar	Continente	Patrón	Distancia	Referencia	Especies
Somalia británica	África	Bandas	158 m	(Macfadyen, 1950)	<i>Andropogon cyrtocladus</i> Stapf <i>Acacia tortilis</i> <i>Acacia etbaica</i> <i>Acacia mellifera</i> <i>Lonchocarpus bussei</i> Harms
Sudan	África	Bandas	217m	(Worrall,1959) (Worrall,1960)	<i>Aristida</i> spp <i>Cymbopogon nerwatus</i> <i>Commiphora</i> sp <i>Schoenfeldtia gracilis</i> <i>Sehima ischaemoides</i> <i>Leptadenia</i> sp
Somalia británica	África	Bandas	90 – 180 m	(Boaler, 1962) (Boaler, 1964)	<i>Acacia bussei</i> <i>Acacia tortilis</i> <i>Andropogon kelleri</i> <i>Dactyloctenium robecchi</i> <i>Chrysopogon aucheri</i>
Sudan	África	Bandas	40 –160m	(Greig-Smith, 1965)	<i>Acacia tortilis</i> <i>Capparis decidua</i> <i>Maerua crassifolia</i>
Somalia británica	África	Bandas	5- 10m	(Hemming, 1965)	<i>Acacia senegal</i> <i>Acacia mellifera</i> <i>Andropogon kelleri</i> <i>Boscia minimifolia</i> <i>Boswellia brichetti</i>
Jordania	Asia	Bandas	60 – 100m	(White,1969)	<i>Artemisia herba-alba</i> <i>Siedlitzia rosmarinifolia</i>
Nigeria	África	Bandas	40 – 150m	(White,1970)	<i>Acacia macrostachya</i> <i>Clarias nigricans</i> <i>Combretum micranthum</i> <i>Ctenium elegans</i> <i>Pennisetum Pedicellatum</i>
Sudan	África	Bandas	60 – 120m	(Wickens, 1971)	<i>Acacia tortilis</i> <i>Acacia senegal</i> <i>Albizia arnara</i> <i>Aristida sieberana</i> <i>Combretum glutinosum</i> <i>Schoenfeldtia gracilis</i> <i>Terminalia brownii</i>
Sudan	África	Bandas	60 – 120m	(Warren, 1973)	<i>Terminalia brownii</i> <i>Albizia arnara</i>
Australia	Australia	Bandas	50- 100 m	(Mabbutt, 1987)	<i>Acacia anuera</i> <i>Eragrostis eriopoda savanna</i> <i>Monachather paradoxa savanna</i>
México	América	Bandas	10 m	(Cornet et al., 1988)	<i>Larrea tridentata</i> <i>Prosopis glandulosa</i> <i>Hilaria mutica</i> <i>Sporobolus airoides</i>
México	América	Bandas	30 - 128 m	(Montana et al., 1990)	<i>Prosopis glandulosa</i> <i>Flourensia cernua</i>
Australia	Australia	Bandas	50- 100 m	(Tongway, 1990)	<i>Acacia anuera</i> <i>Eragrostis eriopoda savanna</i> <i>Monachather paradoxa savanna</i>
México	América	Bandas	100 - 300m	(Montana et al., 1992)	<i>Larrea tridentata</i> <i>Hilaria mutica</i> <i>Sporobolus airoides</i>
Australia	Australia	Bandas	180-280 m	(Dunkerley, 1995)	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> <i>Arriplex vesicaria</i> <i>Kochia</i> sp
Nigeria	África	Bandas	10 – 100m	(Levy et al., 1997)	<i>Combretum nigricans</i> <i>Combretum micranthum</i> <i>Gymnosporia senegalensis</i> <i>Acacia ataxacantha</i> <i>Sclerocarya birrea</i> <i>Boscia angustifolia</i>
Nigeria	África	Bandas	100-300m	(Wallace, 1997)	<i>Guiera senegalensis</i> <i>Combretum micranthum</i>

					<i>Combretum nigricans</i> <i>Acacia ataxacantha</i> <i>Acacia pennata</i>
Nigeria	África	Bandas	70 – 80 m	(Malam Issa et al., 1999)	<i>Arbustos y hierbas perennes</i>
Burkina Faso y Mali	África	Bandas	60 -180 m	(Leprun, 1999)	<i>Panicum laetum</i> <i>Schoenfeldtia gracilis</i> <i>Eragrostis pilosa</i> <i>Andropogon gayanus</i> <i>Acacia ehrenbergiana</i> <i>Acacia ataxacantha</i> <i>Acacia radiana</i>
Nigeria	África	Bandas	35 – 150 m	(Valentin et al., 1999)	<i>Microchloa indica</i> <i>Guiera senegalensis</i> <i>Gardenia sokotoensis</i> <i>Combretum micranthum</i> <i>Boscia angustifolia</i> <i>Boscia senegalensis</i>
Nigeria	África	Bandas	10 – 100m	(Guillaume et al., 1999)	<i>Microchloa indica</i> <i>Cyanotis lanata</i> <i>Combretum micranthum</i> <i>Combretum nigricans</i>
Australia	Australia	Bandas	8- 21m	(Dunkerley, 2002)	<i>Maireana pyramidata</i> <i>Atriplex vesicaria</i> <i>Astrebala pectinata</i> <i>Eucalyptus camaldulensis</i>
Nigeria	África	Bandas	70 – 120m	(Barbier et al., 2006)	<i>Combretum micranthum</i>
Somalia	África	Bandas	90 – 180 m	(Paron, 2007)	<i>Acacia etbaica</i> <i>Acacia bussei</i>
México	América	Bandas	75 _ 190m	(McDonald et al., 2009)	<i>Acacia aneura</i> <i>Flourensia cernua</i> <i>Scleropogon brevifolius</i> <i>Aristida purpurea</i> <i>Prosopis glandulosa</i> <i>Juniperus pinchotii</i> <i>Buchloe dactyloides</i>
USA	América	Bandas	30 – 85m	(Deblauwe et al., 2012)	<i>Flourensia cernua</i> <i>Scleropogon brevifolius</i> <i>Aristida purpurea</i> <i>Prosopis glandulosa</i> <i>Juniperus pinchotii</i>

El patrón Tigre denominado en inglés Spotted, Tiger Bush o vegetation arcs, en francés brousse tigrée y Mogote en México, es el patrón más ampliamente estudiado, las teorías de su formación hasta los años 60-70 fueron un tanto especulativas partiendo de observaciones y descripciones, a partir de los años 70-80 se comienzan pruebas y experimentos de las hipótesis sugeridas anteriormente. En los últimos años desde los 90 al presente, el estudio de patrones comenzó una etapa de generación de modelos matemáticos los cuales intentan explicar los patrones, abordándolos desde una amplia variedad de campos de estudio he hipótesis sobre su formación (Tabla 3). En muchos ambientes semiáridos, la vegetación no es homogénea, sino que se auto-organiza en patrones espaciales. En terreno llano, estos patrones tienen una apariencia aleatoria, pero en pendientes suaves, el patrón de rayas es típico, las bandas de vegetación se prolongan hasta 250 m de ancho, separados por huecos de hasta 1 km, a lo largo de los contornos. Estos patrones se producen en una amplia gama de hierbas y pequeños arbustos (Sherratt, 2007). Los parches densos representan aproximadamente el 20% de la superficie, mientras que el resto de la zona está dominado por el suelo desnudo, con escasa vegetación. Las bandas están formadas por grupos de plantas que se extienden principalmente a lo largo de un eje perpendicular a la pendiente; sus dimensiones varían desde 5 a 50 m de ancho y de 20-400 metros de longitud (Aguiar, 1999). En la formación del patrón intervienen los siguientes factores claves según Tongway (2001):

- ❖ Orientación de las bandas con respecto a la dirección de la pendiente y viento dominante
- ❖ El grado de contraste entre las dos fases del mosaico de vegetación
- ❖ La uniformidad de los suelos debajo de las bandas y las interbandas
- ❖ La infiltración del agua en el suelo

Muchos autores consideran que el flujo superficial es un factor esencial en la formación y el mantenimiento de estos sistemas en bandas (Valentin et al., 1999). Algo que puede dar soporte a esta afirmación es que suelen ubicarse estos patrones en los rangos de precipitación desde los 300mm a los 800mm y en zonas con una ligera pendiente (Figura 6).



**Figura 5.** Patrones de vegetación en Nigeria, según precipitación anual y pendiente. Tomado de: (Valentin et al., 1999).

Otro de los patrones presentes en zonas áridas y semi áridas es el Leopardo, denominado en inglés como Spotted o Leopard Bush, en francés brousse tacheté o manchas. La vegetación tipo Leopardo ha sido reportada en varias regiones del mundo (Tabla 2) más recientemente en comparación con los informes del patrón Tigre. Los parches de cobertura alta o manchas son isodiamétricos o tienen formas circulares irregulares. De manera general, son más variables en tamaño que el de las bandas de vegetación, pueden ir desde 1 metro hasta menos de 100 metros de diámetro, la infiltración del agua es mayor y la evaporación es menor en los parches de vegetación densa, también es común encontrar islas de fertilidad asociadas con las plantas individuales (Aguar, 1999).



**Tabla 2.** Datos de presencia del patrón Leopardo en referencias bibliográficas

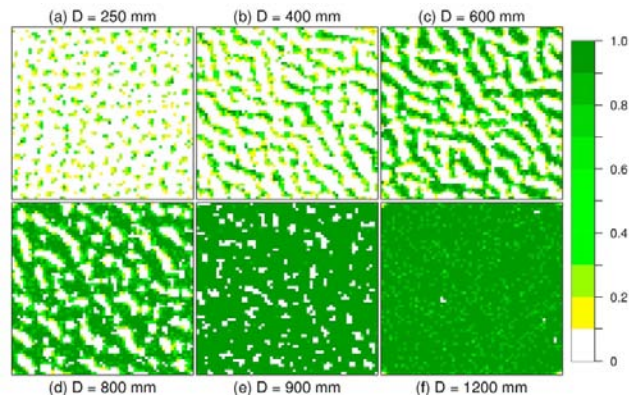
Lugar	Continente	Patrón	Distancia	Referencia	Especies
Sudan	África	Mancha	30-50m	(Wickens 1971)	<i>Acacia mellifera</i> <i>Terminalia brownii</i>
Argentina	América	Mancha	2 m	(Soriano et al., 1994)	<i>Senecio filaginoides</i> <i>Mulinum spinosum</i> <i>Adesmia campestris</i>
Argentina	América	Mancha	2 m	(Sala et al., 1995)	<i>Senecio filaginoides</i> <i>Mulinum spinosum</i> <i>Adesmia campestris</i>
Burkina Faso y Mali	África	Mancha	60 -180 m	(Leprun, 1999)	<i>Panicum laetum</i> <i>Schoenfeldtia gracilis</i> <i>Eragrostis pilosa</i> <i>Andropogon gayanus</i> <i>Acacia ehrenbergiana</i> <i>Acacia ataxacantha</i> <i>Acacia radiana</i>
Río Mayo - Argentina	América	Mancha	2 m	(Aguiar 1999)	<i>Stipa speciosa</i> <i>Swietenia humilis</i> <i>Poa ligularis</i> <i>Mulinum spinosum</i> <i>Adesmia campestris</i> <i>Senecio filaginoides</i>
Burkina Faso	África	Mancha	30 – 50 m	(Couteron,2001)	<i>Combretum micranthum</i> <i>Pterocarpus lucens</i> <i>Anogeissus leiocarpus</i>
Negev - Israel	Asia	Mancha	1-2 m	(Meron, 2004)	<i>Paspalum vaginatum</i> <i>Poa bulbosa</i>
España	Europa	Mancha	1-2 m	(Imeson,2004)	<i>Stipa tenacissima</i>
Chihuahua Las Cruces, NM	América	Mancha	1-2m	(Bestelmeye, 2006)	<i>Pleuraphis mutica</i> <i>Prosopis glandulosa Torr</i> <i>Flourensia cernua</i> <i>Lycium berlandieri</i> <i>Larrea tridentata</i>
Zambia	África	Mancha	15-30m	(Borgogno,2009)	No hay datos
Nigeria	África	Mancha	2-50m	(Lefever, 2009)	<i>Combretum micranthum</i>
Desierto del Monte, Argentina	América	Mancha	2- 3m	(Bisigato, 2009)	<i>Prosopis flexuosa</i> <i>Larrea divaricata</i> <i>Aristida adscensionis</i>
New Mexico	América	Mancha	20-40m	(Yetemen,2010)	<i>Juniperus monosperma</i> <i>Bouteloua eriopoda</i> <i>Larrea tridentata</i> <i>Erioneuron pulchellum</i>
Namibia	Africa	Mancha	3-5m	(Juergens, 2012)	<i>Stipagrostis sabulicolae</i> <i>Cladoraphis spinosus</i>

La definición teórica de los patrones “Tigre” y “Leopardo” y otros regulares denominados "Laberinto" observados a menudo en los pantanos de Norte América y Eurasia, ha sido de gran dificultad, pero la mayoría de hipótesis señalan que la formación de estos patrones de vegetación está vinculada al herbivorismo, el fuego, las condiciones anisotrópicas ambientales (en particular la pendiente), y otros factores como la diseminación de corta y larga distancia, además de la competitividad entre especies de la vegetación (Cheng et al., 2010). El estudio de los patrones en la vegetación de zonas áridas, en especial el patrón Tigre ha pasado por diversas etapas en los últimos 50 años, en las últimas dos décadas con el aumento en la capacidad de procesamiento y los avances en modelamiento numérico han hecho que el estudio de patrones inicie un período de "simulación" para tratar de entender su comportamiento y complejidad desde el punto de vista matemático (Tabla 3).

**Tabla 3.** Datos de simulación de patrones en referencias bibliográficas

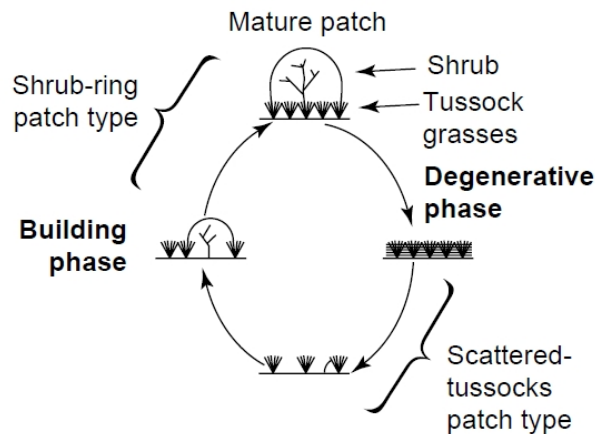
Lugar	Continente	Patrón	Datos	Referencia	Modelo
Nigeria	África	Bandas	Campo	(Blyth, 1995)	Numérico
Australia	Australia	Bandas	Simulación	(Dunkerley, 1997)	Celular automática
Mundial	Mundial	Bandas	Simulación	(Lefever, 1997)	Numérico
Burkina Faso	África	Bandas y Manchas	Simulación Campo	(Lejeune, 1999)	Modelo Isotropico Modelo anisotrópico
Burkina Faso	África	Bandas	Simulación Campo	(Rietkerk et al., 2000)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas y Manchas	Simulación	(Hardenberg,2001)	Numérico
Burkina Faso	África	Bandas y Manchas	Simulación Campo	(Couteron, 2001)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas	Simulación	(Hillerislanders,2001)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas y Manchas	Simulación	(Gilad et al., 2004)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas	Simulación	(Ursino, 2005)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas	Simulación	(Ursino, 2006)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas	Simulación	(Saco et al., 2007)	Numérico
Nigeria	África	Manchas	Simulación	(Barbier et al., 2008)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas y Manchas	Simulación	(Manor 2008)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas	Simulación	(Xing Liu, 2008)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas y Manchas	Simulación	(Kefi et al., 2008)	Numérico
Chile	América	Bandas	Simulación	(Borthagaray et al., 2008)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas y Manchas	Simulación	(Guo et al., 2011)	Numérico
Sudan	África	Bandas	Simulación	(Deblauwe et al., 2011)	Numérico
Sudan	África	Bandas	Simulación	(Gavan et al., 2012)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas y Manchas	Simulación	(Baek et al., 2013)	Numérico
Mundial	Mundial	Bandas	Simulación	(Chaiya et al., 2015)	Numérico

Hasta la fecha, la mayoría de los modelos matemáticos (Figura 6) utilizan información teórica referida al patrón Tigre, se centran principalmente en simulación de las rayas perpendiculares a la dirección del flujo en sistemas semiáridos (Tabla 3). La formación de la vegetación tipo Leopardo también ha recibido mucha menos atención en esta nueva etapa de modelamiento numérico sobre patrones en zonas áridas. Hasta ahora no existe un consenso sobre el verdadero origen del patrón Tigre y mucho menos sobre el patrón Leopardo tradicionalmente menos conocido y minoritariamente analizado.



**Figura 6.** Modelo numérico, vegetación en función de la precipitación. Tomado de: (Gavan et al., 2012)

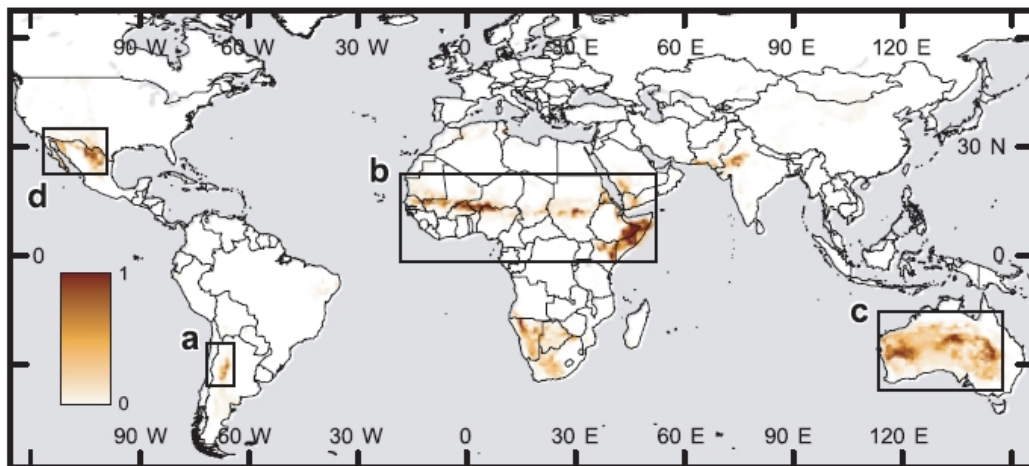
Aunque el patrón Tigre ha sido más ampliamente estudiado en las regiones semiáridas de África, Asia, Australia y Norte América, al realizar una comparación de los estudios en dinámica de los patrones Leopardo, este es el menos estudiado. Particularmente en el continente Americano existen estudios iniciales referidos al patrón Tigre desde finales de los años 80 principalmente en México (Cornet et al., 1988) y posteriormente en Estados Unidos (Deblauwe et al., 2012) desarrollados en el desierto de Chihuahua, las primeras referencias al patrón Leopardo (Figura 7) se reportaron en la Patagonia Argentina (Sala et al., 1996; Aguiar, 1999) y posteriormente en Estados Unidos (Bestelmeye, 2006; Yetemen, 2010). Sin embargo, es importante destacar que no se dispone de información previa sobre investigaciones que caractericen los patrones de la vegetación Leopardo en Colombia y los análisis de vegetación se han enfocado en caracterizar la composición florística presente en zonas áridas, pero no existen estudios sobre la distribución espacial del patrón Leopardo.



**Figura 7.** Modelo propuesto de patrón leopardo de la Patagonia, representa dos fases de sucesiones cíclicas donde los arbustos facilitan el establecimiento de las gramíneas. Tomado de: (Sala et al., 1996)

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad no existe un consenso específico sobre la formación del patrón Tigre, principalmente por el número de hipótesis y puntos de vista sobre su formación y desarrollo. El patrón Tigre ha sido ampliamente estudiado (Tabla 1) desde hace aproximadamente 50 años y desde muchas disciplinas (Ecología, Biología, Geomorfología, Geografía, Matemática) pero muy poca atención se ha centrado sobre los aspectos del desarrollo y formación del patrón Leopardo. Las teorías del porqué de la existencia del patrón Leopardo son basadas en las mismas hipótesis generales de la investigación del patrón Tigre, se extrapolan a que la formación de este patrón puede contener los mismos elementos que intervienen en el desarrollo de patrones en África, Australia y México, debido a que muchos de estos patrones pueden aparecer en lugares donde hay presencia del patrón Tigre, así mismo, se ha informado que en algunas regiones con patrón Tigre, la vegetación en manchas a veces ocurre en las proximidades de estructuras en bandas Macfadyen (1950) pero ha recibido mucha menos atención. Además, varios autores que han presentado datos de patrón Tigre no informan de sus observaciones sobre la vegetación en mancha (Por ejemplo en México, A. Cornet, 1988) por lo tanto, los patrones en mancha pueden ser mucho más ampliamente distribuidos de lo que parece desprenderse de la existente literatura, y como el Tiger Bush, puede tener una amplia distribución mundial (Couteron, 2001). A diferencia de los primeros vuelos en donde se observaron patrones Tigre, actualmente se puede acceder a una gran cantidad de información detallada (1 a 5m) disponible en los archivos de las últimas misiones de satélites de alta resolución, dando una mirada sin precedente a el análisis en detalle de casi cualquier lugar de la tierra. Con los avances en observación de la tierra ciertos patrones ahora observables desde satélites, con productos de teledetección (por ejemplo IKONOS o QUICKBIRD), podrían ser utilizados como indicadores de proximidad a los umbrales de desertificación (Rietkerk et al., 2004). Existe un modelo de distribución mundial de patrones periódicos de la vegetación en zonas áridas y semiáridas (Figura 8) en el cual intentan aislar la causalidad de todos los patrones en conjunto no haciendo distinción entre ellos y a una escala global poco detallada utilizando imágenes del satélite LandSat con una resolución espacial de 15m y un modelo matemático de máxima entropía (Deblauwe et al., 2008).



**Figura 8.** Modelo de los patrones de vegetación periódica. Tomado de: (Deblauwe et al., 2008)

El desconocimiento general del porqué del patrón Leopardo se evidencia en la poca referencia bibliográfica que trata específicamente el tema (Tabla 2 y 3), Aguiar (1999) es el único que presenta análisis detallados del porqué del desarrollo de esta vegetación en la Patagonia Argentina sobretudo en vegetación periódica tipo gramíneas, en Colombia no existen estudios,

ni se tenía idea de la existencia del patrón Leopardo en la península de la Guajira, hasta las primeras pruebas recabadas por este autor en salidas de campo desde el año 2012, se desconocía su formación, desarrollo y menos aún su vínculo biogeográfico. La Guajira es una zona particular no sólo por su ubicación al norte de Sur América, sino por sus aspectos climáticos extremos. En este sentido, al momento, las evidencias de estos patrones sólo se habían podido observar mediante sensores remotos, pero se desconocía el origen y comportamiento de la vegetación en la zona árida de la Guajira. Finalmente, la carencia de esta información a nivel nacional y mundial se ve reflejada en la falta de estrategias de conservación ligadas a este tipo particular de formación vegetal, de tal manera que se hace urgente su estudio y conocimiento, para brindar herramientas para su mantenimiento al largo plazo, en especial en zonas áridas donde los hábitats son frágiles y amenazados por la presión humana y los efectos del cambio global. Este estudio aporta a la comprensión regional y global de los patrones vegetales en zonas áridas brindando particularmente nuevos conocimientos y pruebas de la existencia y del porqué de la formación del patrón Leopardo en zonas áridas como la Guajira.

### 1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es estudiar y determinar los aspectos biogeográficos vinculados a la distribución y composición actual del patrón Leopardo en la Península de la Guajira para contribuir a su conocimiento, conservación y manejo. En función de este objetivo principal se pueden desglosar en cinco objetivos específicos que son tratados de forma secuencial en la parte final de este trabajo.

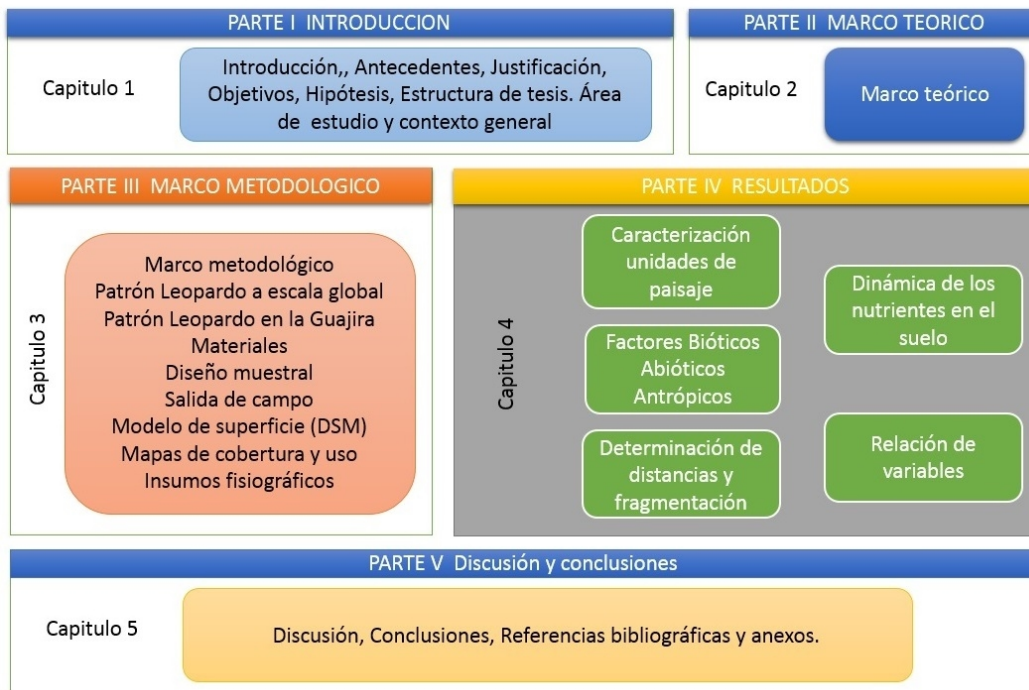
- 1) Determinar unidades de paisaje a partir de la caracterización de la geomorfología, el suelo y la vegetación.
- 2) Conocer los factores determinantes vinculados a los patrones actuales de distribución espacial de la vegetación Leopardo.
- 3) Determinar la distancia y la composición típica entre los grupos y parches de vegetación en el entorno geográfico de la Guajira.
- 4) Conocer la dinámica de los nutrientes del suelo en el entorno de los parches y espacios entre la vegetación.
- 5) Determinar la relación entre de las variables antrópicas, biofísicas, climáticas y edáficas vinculadas a la distribución espacial de la vegetación en el patrón Leopardo.

### 1.4 HIPOTESIS

La hipótesis principal de esta tesis plantea que la distribución y composición del patrón Leopardo en la península de la Guajira es originada por la interacción entre los aspectos antrópicos y los aspectos ambientales tales como el viento, el agua y la geomorfología; siendo esta interacción la que produce en ciertas partes del paisaje la acumulación de nutrientes en el suelo donde se desarrollan las formaciones vegetales. Teniendo en cuenta todas las referencias anteriores sobre la investigación de patrones espaciales en zonas áridas en el capítulo introductorio, esta tesis asume que existe una relación general entre la formación del patrón Tigre y Leopardo, que implica entender que no pueden existir sin comprender las condiciones sociales y espaciales necesarias para su formación.

## 1.5 ESTRUCTURA DE TESIS

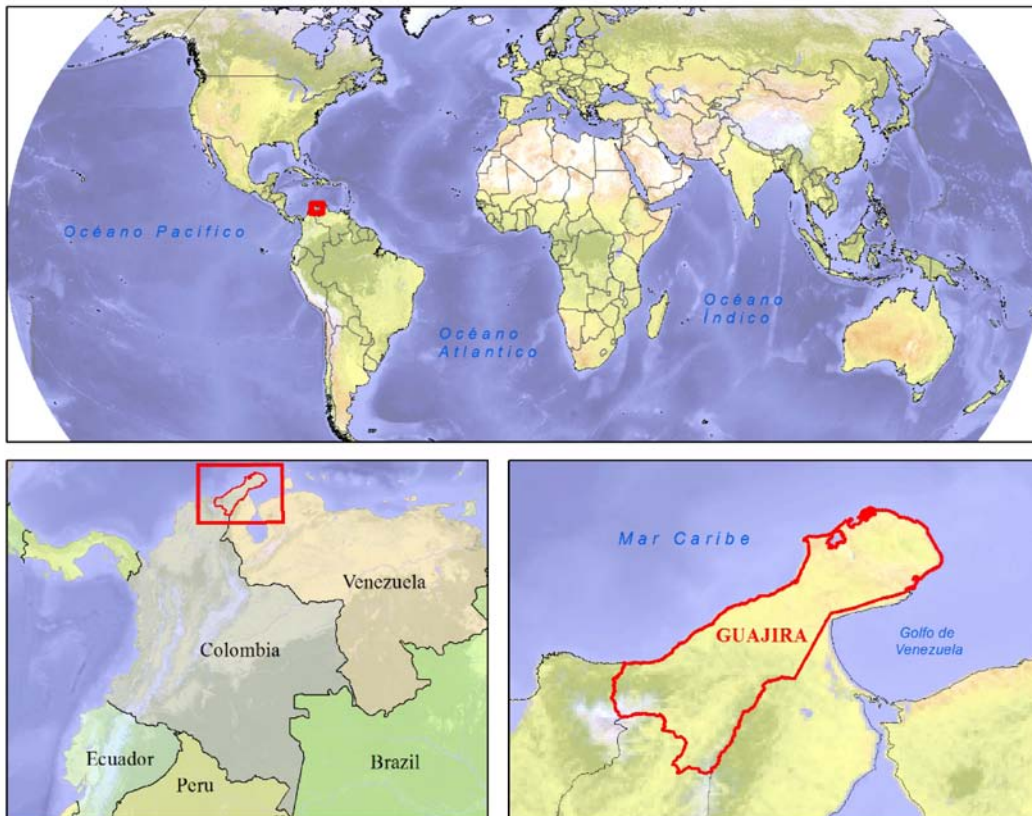
La tesis se estructura en 5 partes, y 5 capítulos. Cada parte está pensada para diferenciar claramente el tipo de contenido y para estructurar la narración en forma de bloques homogéneos. En su interior, cada parte se desglosa en diversos capítulos y sub capítulos que organizan temáticamente la información. El trabajo se ha estructurado de tal manera que a partir del capítulo cuarto, cada parte se ocupe de la resolución de un objetivo concreto de la tesis, tal y como se puede ver en la Figura 9.



**Figura 9.** Diagrama general de la estructura de tesis

## 1.6 ÁREA DE ESTUDIO Y CONTEXTO GENERAL

La península de la Guajira, es una extensión de tierra que se ubica al norte de Colombia y Venezuela rodeada por el Mar Caribe, tiene una característica especial al ser la zona continental más septentrional de Sur América con un área aproximada de 6800 km<sup>2</sup> (Figura 10), enmarcada entre las coordenadas geográficas 11°34'57.11"Norte y 71°58'1.29"Oeste a 12°27'12.04"Norte y 71°39'47.44"Oeste, zona de convergencia intertropical (ZCIT), clasificada como desierto subtropical costero.



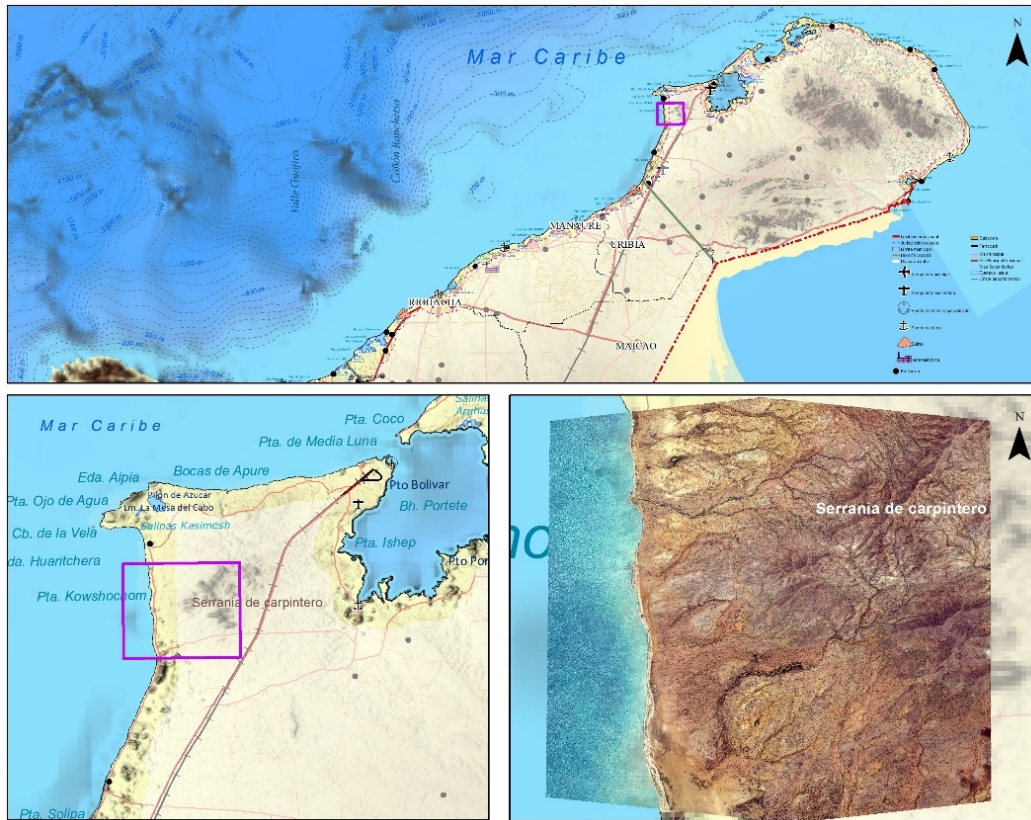
**Figura 10.**Ubicación de la península de la Guajira (Ver mapa en Anexo 1).

Dentro del departamento Colombiano se denomina la Alta Guajira a la zona peninsular, esta se caracteriza por tener grandes extensiones planas y presencia de algunas serranías bajas (Macuira, Jarara, Cosinas, Simarúa, Carpintero) cuyo punto más elevado no supera los 867 MSNM. El área baja está integrada por playas, llanuras costeras, salares y cuerpos de dunas, que superan en algunos casos los 20 m de altura ubicados en mayor porcentaje en la costa norte, además de planicies aluviales y acantilados de poca altura. Dado el régimen climático, el sistema fluvial es dominado por arroyos con corrientes cuyos cauces permanecen secos la mayor parte del año y son inundados solo en épocas de lluvias, generando corrientes violentas de corta duración, que socavan profundamente los cauces y transportan abundante material desde las serranías hacia las llanuras (Marín, 1992). Recientes investigaciones en localidades fosilíferas de la alta Guajira Colombiana sugieren que hasta hace por lo menos tres millones de años, lo que hoy es un desierto fue un lugar boscoso con ríos caudalosos y sinuosos, con una gran variedad de reptiles, peces, invertebrados y mamíferos (Moreno et al, 2015). La Guajira ha sido habitada por indígenas pertenecientes en su mayoría a la etnia Wayúu. De acuerdo con el censo de 2005, el 45% de la población en la península pertenece a este grupo poblacional que a su vez

representa el 20% del total de grupos indígenas a nivel nacional (FIP, 2011). El pueblo Wayúu, de familia lingüística Arawak, migró del Amazonas al desierto de La Alta Guajira hacia el 150 a.C. Poco a poco fueron ocupando la península en un largo proceso de asentamiento que significó un poblamiento disperso de acuerdo con la aridez del terreno y la posibilidad de tener fuentes de agua para todos. El departamento de la Guajira se comunica con el interior del país por medio de la principal arteria vial del Caribe Colombiano, la troncal del Caribe. Esta es una vía de primer orden que se encuentra pavimentada hasta el municipio de Uribía, desde este punto las vías de acceso no tienen pavimento y son vías rústicas, debido a esta situación para poder acceder a la alta Guajira es necesario hacer uso de vehículos con doble tracción y guías que conozcan la región. Este territorio contiene un sistema de montañas, sierras y serranías, que guardan en sus entrañas la memoria, la historia y la mitología; son regiones de origen de las castas, del reposo de los muertos y el hábitat de diferentes deidades que conforman la mitología Wayúu, un complejo sistema de espíritus, mitos y leyendas que ordenan y zonifican el territorio. La ocupación territorial tiene un fundamento cosmogónico de cuatro generaciones donde cada una interactúa en el territorio con las demás, permitiendo convivencia y apoyo mutuo para la sobrevivencia (Fundación Alisos, 2011).

El área de estudio específica donde se desarrolló el trabajo fue en un cuadrángulo en el corregimiento del Cabo de la Vela zona costera de la península de la Guajira, esta área está dentro del municipio de Uribía y el resguardo indígena de la Alta Guajira, la zona es habitada en su totalidad por comunidades indígenas (Figura 11). El relieve es en un gran porcentaje plano con presencia de algunas serranías y colinas bajas, que abarcan alturas desde los 0 a los 200 MSNM en su parte más alta, los habitantes se dedican al pastoreo de ungulados (cabras y ovejas) y a la pesca artesanal en la zona costera colindante (Mar Caribe). Está situada en las proximidades de la población del Cabo de la Vela (Jepirra en lengua Wayúu) y al lugar más importante para la cosmogonía indígena la denominada montaña sagrada Pilón de Azúcar (Cerro Kamachi), así como, cerca de los cerros Mayayura, Palaamana, Patsuarali y la serranía de Carpintero. Tiene un área aproximada de 43 km<sup>2</sup> unas 4300 Ha, teniendo 7km de largo por 6.2 km de ancho con un perímetro de 26km<sup>2</sup> (Figura 41), enmarcada entre las coordenadas geográficas 12° 8'54.92"Norte y 72° 7'18.76"Oeste a 12° 7'12.85"Norte y 72° 7'18.57"Oeste, zona de convergencia intertropical. En inmediaciones del área se ubica el parque eólico Jepírachi el cual tiene una capacidad instalada de 19,5 MW de potencia nominal, con 15 aerogeneradores de 1,3 MW cada uno, sometidos a los vientos alisios que soplan casi todo el año en esta parte de la península a un promedio de 9,8 metros por segundo. El parque entró en operación comercial plena el 19 de abril de 2004 y hace parte de un programa mayor para el aprovechamiento de la energía eólica en la Alta Guajira. Jepírachi está registrado como Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. Fue uno de los primeros proyectos MDL firmados en Colombia y uno de los primeros en todo el mundo, lo cual se constituye en un hito importante en la historia del mercado del carbono. Igualmente las metodologías de estimación de emisiones y sobre todo las de concertación del proyecto con la comunidad Wayúu, fueron consideradas como ejemplares por el Banco Mundial y como referencias obligatorias para el desarrollo de proyectos similares en otras partes del mundo (EPM, 2010).





**Figura 11.** Ubicación del área de estudio en la península de la Guajira. (Ver mapa en Anexo 2)

A 12 kilómetros del área se localiza Puerto Bolívar ubicado en Bahía Portete, es el terminal carbonífero más importante de América Latina y uno de los de mayor tamaño del mundo, Puerto Bolívar cuenta con un sistema de cargue directo desde 1985, recibe barcos hasta de 180.000 toneladas de peso muerto, con 300 metros de eslora y 45 metros de manga. Su canal navegable tiene 19 metros de profundidad, 225 metros de ancho y cuatro kilómetros de largo. La rata anual promedio de cargue actual es de 6.300 toneladas por hora, con picos hasta de 11.000 toneladas por hora. Dentro del área de influencia territorial la capital del departamento de la Guajira Riohacha se encuentra a una distancia de 120 km y de la capital de Colombia a 900 km.

### 1.6.1 Historia y aspectos sociales de península de la Guajira

La pauta de asentamiento típica de los grupos sociales en la Guajira fue la de grandes aldeas nucleadas y pequeños poblados satélites que ya no mantuvieron sus poderes autárquicos sino que, quedaron integrados a una compleja red de castas o linajes con prerrogativas hereditarias y gradación de rangos. A esta formación social se le conoce como cacicazgo y fue la que encontraron los españoles a su llegada en el siglo XVI a la costa Caribe Colombiana. Los estudiosos han establecido una clasificación de las etnias precolombinas dividiéndolas en tres grandes familias lingüísticas: Arawak, Chibcha y Caribe. A la primera pertenecen o pertenecieron los grupos Wayúu, quienes con otros grupos opusieron siempre una férrea resistencia bélica a los intentos de reducción de la Corona Española. El interés colonizador de la región sólo surgió a partir de 1525 con la fundación de Santa Marta. En poco más de dos décadas se multiplicaron las ciudades a lo largo de la costa y en el interior: Cartagena (1533), Tolú y Sincelejo (1535), Mompox (1537), Riohacha (1545) y Valledupar (1550). Estos núcleos urbanos fueron enclaves económicos y militares desde donde se organizó la explotación de las tierras conquistadas y la

sujeción de las poblaciones indígenas. Para ello la Corona Española se decidió a nuclear la dispersa población indígena en lo que se denominó “pueblos de indios”. Además, se organizó el sistema de encomienda que permitió sostener la sociedad Española mediante el cobro de tributos a las poblaciones indígenas. Sin embargo, la resistencia belicosa de los indígenas Chimila y Wayúu, respectivamente, impidió el funcionamiento cabal del sistema tributario Español (Fundación Alisos, 2011). La moderna y contemporánea literatura antropológica sobre la Guajira sostiene que la población Wayúu se organiza en clanes, los cuales en esencia son grupos de filiación cuyos miembros afirman descender de un antepasado común pero que no necesariamente pueden demostrar tal filiación. Cada uno de los clanes tiene un animal totémico con el que se representan, marcas distintivas y un nombre particular que los identifica. La consanguineidad juega un papel básico en el parentesco Wayúu, que agrupa a los individuos unidos en cadena por igualdad de ascendientes femeninos, es decir, el parentesco uterino, aunque no por ello el parentesco paterno deja de ser importante. En ese sentido, el parentesco está definido por dos componentes básicos: carne y sangre (Polo, 2011). El pueblo Wayúu, de familia lingüística Arawak, migró del Amazonas al desierto de La Alta Guajira hacia el 150 a. c. Poco a poco fueron ocupando la península en un largo proceso de asentamiento que significó un poblamiento disperso de acuerdo con la aridez del terreno y la posibilidad de tener fuentes de agua para todos. El origen de la fertilidad nace de la unión del padre Juya (Lluvia) y la madre M’ma (Tierra). Juya recorre todo el territorio Wayúu, que representa a la vagina de la tierra, que lo espera para recibir su semen, representado en gotas de agua que caen al suelo. En una tierra semidesértica, el agua dulce es la fuente de vida y de alegría, hay comida, hay fertilidad que son el resultado de todo el encuentro de emociones y sensaciones de las cuatro generaciones Wayúu. Esta concepción integrada determina el carácter matrilineal en su organización social y el por qué la mujer permanece en su territorio materno cuidando a su familia, mientras que el hombre se mueve como Juyakai por La Guajira, visitando y fertilizando a sus mujeres. La muerte constituye una de las ocasiones más importantes de la vida. El mundo Wayúu celebra dos velorios, el primero cuando ocurre la muerte física y el segundo es la exhumación de los huesos y el traslado a su cementerio de origen, en el territorio de su clan materno. El mundo onírico tiene tanta importancia para la cultura Wayúu, que la interpretación de los sueños puede modificar radicalmente los planes de una persona o comunidad. La tradición oral Wayúu se alimenta día a día a través de sueños, visiones, apariciones y comunicaciones con los Wayúu de la primera generación, y de manera dinámica, se va determinando una zonificación de uso y manejo en los diferentes sitios del territorio Wayúu. Las zonas establecidas para huertas, juegos, lugares de tránsito, lugares de caza, selección para la construcción de cementerios y viviendas están determinadas por un complejo orden mitológico, en muchos casos por miedo a enfermedad o desaparición. Son estos espíritus, quienes a través de sueños o visiones reales se comunican con el Wayúu y establecen restricciones y prohibiciones en la extracción de los recursos naturales (Fundación Alisos, 2011).

## **1.6.2 Ordenamiento territorial y clanes**

La mitología Wayúu afirma que Ma’leiwa (Ser Supremo), bajó en un caballo blanco y le solicitó a Juya que lanzara un rayo sobre la Piedra de Aalasü y grabó los símbolos de cada casta Wayúu: Los Ipuana, los Jusayuu, los Sapuana, los Epieyuu, etc. De allí, cada casta tomó su símbolo totémico para herrar sus ganados y señalar la procedencia de su parentela, sus tejidos, cerámicas, y sobre todo un territorio familiar que les garantiza una fuente de agua y un orden de convivencia de un mismo pueblo organizado en clanes que ocupan territorios específicos manteniendo el orden de su procedencia. Cada clan familiar tiene un territorio distinto y cada uno de estos territorios posee su origen, generalmente el origen está representado en algún recurso natural que emana de la tierra, como piedra, pozos naturales y ojos de agua. La mujer es la fuente de origen, es quien forja la vida de todos los miembros, y los organiza. Los territorios

ancestrales están delimitados por linderos identificados y marcados por sus ancestros con referentes naturales como cerros, arroyos, piedras y árboles. La historia y los límites del territorio clanil no tienen memoria escrita, se transmiten de generación en generación a través de las historias de los viejos. En el territorio Wayúu, constantemente hay acuerdos y arreglos tradicionales entre clanes que permiten o prohíben la utilización temporal o total de sus territorios y sus recursos. Existen muchos casos en que un grupo familiar permite a otro establecerse temporalmente en su territorio, por ejemplo, cuando cede un pedazo de tierra por matrimonio, y el marido trae su familia apushi a trabajar en el territorio, o cuando se pide en préstamo un territorio por ubicación de interés de alguna zona específica, como cerca a un pozo de agua para la construcción de alambique en la producción de chirinchi (bebida alcohólica artesanal Wayúu), o frente a una bahía para la construcción de un puerto. La organización del resguardo se mantiene con la forma de ocupación tradicional Wayúu: diversas fuentes de agua centralizadas en puntos específicos, lo que implica la costumbre y labor de la jimaura de recolectar agua, un cementerio, una zona de pastoreo común a todas las familias y una huerta parcelada por familias. Los ocupantes de estos resguardos viven una economía de subsistencia, practican el pastoreo de caprinos como actividad económica principal, y de bovinos en menor escala y practican la agricultura de pan coger. La Alta, Media y Baja Guajira son áreas desérticas y semidesérticas, tradicionalmente zonas de pastoreo, producción de sal, pesca y por las condiciones del desierto, escenario de economías ilegales: contrabando (desde especies y géneros en la Colonia hasta combustibles hoy en día); tráfico aéreo y terrestre de drogas (marihuana en la década de los 70 y coca y amapola en la actualidad); más todas las actividades ilegales y violentas que esta ilegalidad conlleva. La Baja Guajira, con suelos fértiles y de aptitud agrícola, representa el territorio rico en suelos y recursos del departamento y por tanto, el mayor potencial actual para generar empleo y oportunidades económicas (Fundación Alisos, 2011).

### 1.6.3 Cartografía histórica

La evolución del conocimiento territorial de la Guajira comienza desde los primeros mapas en el 1500 luego de la llegada de Colón, en su tercer viaje descubre realmente el continente Americano. Juan de la Cosa, cartógrafo de la expedición de Alonso de Ojeda, dibujó el primer mapa de la costa occidental de Venezuela donde aparece por primera vez el nombre de la península de la Guajira y la primera referencia de Venezuela (Figura 12).



Figura 12. Carta de Juan de la Cosa del año 1500.

La Guajira también se muestra en el Mapa de la 'Terra Nova' dibujado por Waldseemüller en 1513. Donde se revela la continuidad del litoral entre el norte y el sur de América más las islas del Caribe y existe una pequeña referencia a la península (Figura 13).

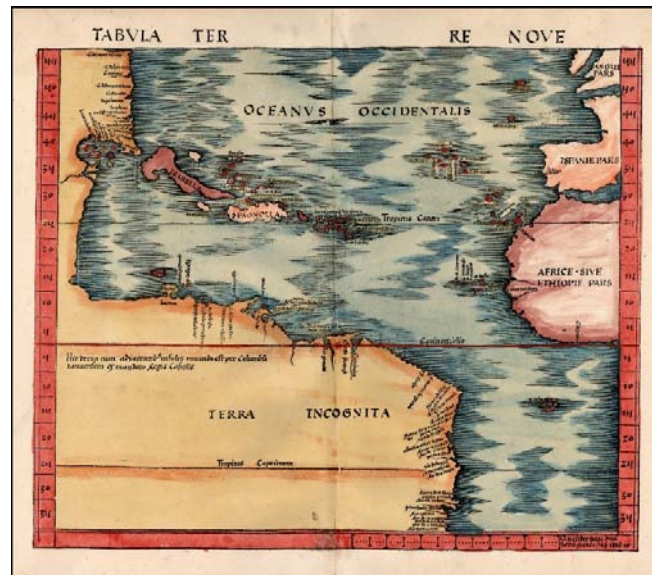


Figura 13. Mapa de la 'Terra Nova' Waldseemüller del año 1513.

El primer mapa conocido específicamente de la Guajira fue el de Joseph Xavier de Pestaña (Figura 14). Para las autoridades españolas del siglo XVIII los indios Guajiros o Wayúu, como son conocidos actualmente, eran prácticamente una nación enemiga. En 1718 el gobernador Soto de Herrera había dicho que eran bárbaros, ladrones cuatrerros, dignos de la muerte, sin Dios, sin ley y sin Rey. En igual forma los veía el virrey Pedro Messía de la Zerda, quien en 1769, un mes antes de que tuviera lugar el llamado "levantamiento general de la nación Guajira", dijo que eran "ambiciosos, traidores, vengativos, desconfiados y llenos de abominaciones" (Barrera, 1990).



Figura 14. Mapa de la Guajira por Joseph Xavier de Pestaña, 1753.

Los mapas creados posteriormente trataron de representar la forma de la península con mayor exactitud con fines militares (Figura 15). Con los nuevos mapas se comprendió la extensión y límites, se analizó la situación de los nuevos pueblos y de los que se redujeron a principios del año de 1773, luego de la sublevación en el año 1769, y la de otros que se fundaron; e igualmente las nuevas fundaciones españolas hechas a fin de conseguir la pacificación general de la Guajira.

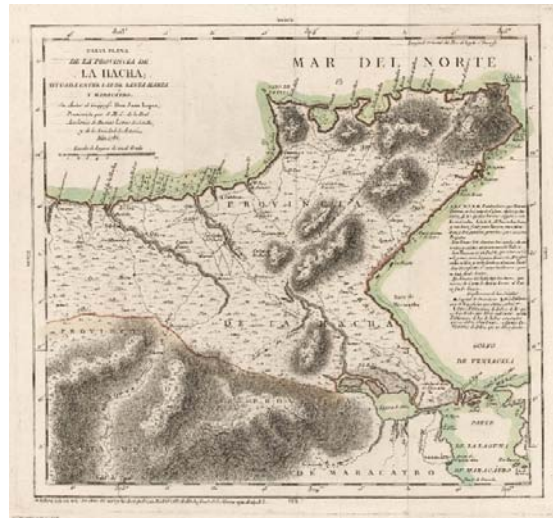


Figura 15. Carta de la provincia de La Hacha; por Juan López 1786.

Luego de la pacificación territorial la Guajira siguió relativamente olvidada desconociendo muchos de sus aspectos geográficos, componentes territoriales y aspectos sociales, el gobierno nacional a finales de 1881 encarga a geógrafo inglés F.A. A. Simons estudiar los estados del Atlántico, Magdalena y Bolívar, y en especial escribir un informe sobre la región hasta entonces inexplorada de los indios de la Guajira, este fue publicado en un artículo de la Royal Geographical Society en diciembre de 1885 (Figura 16).

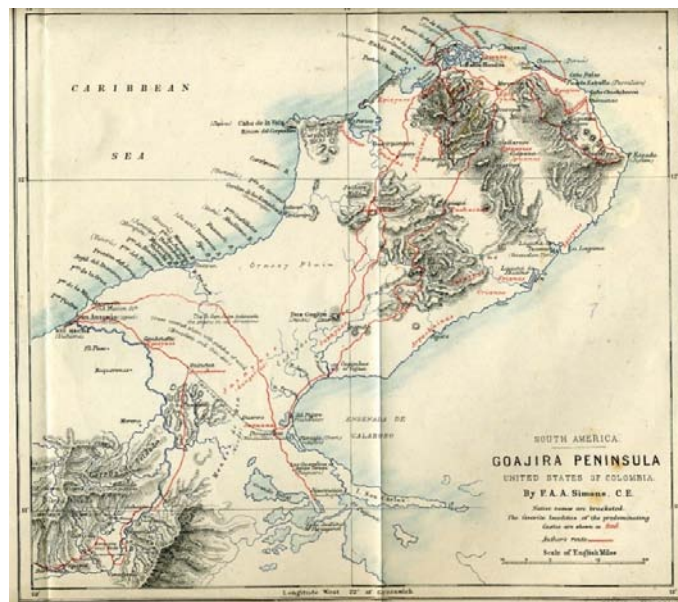


Figura 16. Península de la Guajira estados unidos de Colombia; por F.A.A. Simons 1885.

La esquina noreste de los Estados Unidos de Colombia (antes Nueva Granada) termina en una gran península, con una proyección de unas 120 millas hacia fuera en el mar Caribe, forma la extensión del Golfo de Maracaibo. Esta península es conocida como la Guajira. Fue cedida por el Estado de Magdalena en 1872, para formar un territorio nacional, para la civilización de sus indios. La mitad de ella, sin embargo, es reclamada por los venezolanos, y una disputa que en algún momento amenazaba con desembocar en una guerra entre las dos naciones, se resolvió amigablemente al referirse la cuestión al Rey de España como árbitro (Simons, 1885). Al estudio inicial de Simons le siguieron otras descripciones y exploraciones sobre la península a lo largo del siglo XX utilizando como referencia la cartografía y descripciones de este trabajo.

## PARTE II

---



*Bahía Portete*

## CAPÍTULO 2 (MARCO TEÓRICO)

---

## II. MARCO TEORICO

---

### 2.1 AMBIENTES ÁRIDOS

La Convención de las Naciones Unidas contra la Desertificación define las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas como aquellas zonas en las que la relación precipitación y evapotranspiración potencial (anual) está entre 0.05 y 0.65, excluidas las regiones polares y subpolares (UNEP, 1992). Son tierras áridas o secas aquellas en las que se registra un equilibrio negativo entre los insumos (nivel de precipitaciones anuales) y las pérdidas de humedad (evapotranspiración). La aridez implica un déficit pluviométrico permanente (fenómeno climático de largo tiempo), lo cual está ligado a otras condiciones climáticas específicas, como temperaturas elevadas, baja humedad de aire y fuerte evaporación. Es definida usualmente en términos de baja precipitación promedio o agua disponible (Lobo, 2004).

#### 2.1.1 Población en ambientes áridos

En las regiones áridas, el uso de los ecosistemas es limitado tradicionalmente al pastoreo. Su productividad primaria está restringida por el bajo nivel de agua en el suelo como resultado de la baja precipitación y alta evaporación. Abarcan desde los desiertos hiper-áridos y áridos las praderas semiáridas y zonas subhúmedas secas. Las poblaciones que viven en las tierras secas están muy por detrás de los indicadores de desarrollo humano. Una manifestación de la cruda realidad se encuentra en los indicadores como la tasa de mortalidad infantil, abarcando un rango de 16 a 70 por cada 1.000 nacidos en las tierras secas de los países en desarrollo. El valor promedio mundial de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) es de 4 por cada 1000 nacidos. Aproximadamente la mitad de las personas en el mundo que viven por debajo del umbral de la pobreza se encuentran en las tierras secas. Por lo tanto, la reducción de la pobreza en las tierras secas es crucial para alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). Varios factores subyacen a la difícil situación de las personas que viven en las tierras secas o en condición de degradación (desertificación). Las actividades antropogénicas son casi enteramente responsables de estos factores. Incluidos en la lista de estos factores se encuentra la utilización excesiva de la cubierta vegetal mediante la gestión de tierras de pastoreo inadecuado, mala planeación de la conversión de los pastizales en tierras de cultivo a través de los sistemas de riego y la degradación de la calidad del suelo a través de la salinización y la contaminación por químicos. Los ecosistemas y las poblaciones de las zonas áridas son los más vulnerables a la pérdida de bienes y servicios ecosistémicos (ME Assessment, 2005).

La aridez es un término que la mayoría de las personas comprenden conceptualmente, y evoca imágenes de las tierras secas del desierto con cuerpos dispersos naturales de aguas superficiales, pocas precipitaciones, y comúnmente sólo escasa vegetación, que está adaptada a la escasez de agua. La aridez tiene una amplia variedad de manifestaciones en el paisaje, incluyendo rocas estériles colinas y llanuras, campos de dunas y vegetación dominada por cactáceas y otras plantas xerófilas (Maliva, 2012). La aridez también ocurre en regiones con climas fríos en los que la precipitación cae principalmente como nieve. Gran parte de la Antártida y la vertiente ártica de Alaska se consideran desiertos polares porque reciben poca precipitación neta cada año (Smiley, 1971). Se han propuesto numerosas clasificaciones climáticas y biológicas de las tierras áridas. Aridez, tal como se define por la escasez de humedad, es esencialmente un fenómeno climático que se basa en las condiciones climáticas medias de una región (Agnew, 1992). Existe una diferencia fundamental entre la aridez, que es un fenómeno permanente y las sequías climáticas a largo plazo, que son un fenómeno temporal (déficit hídrico).



## 2.1.2 Índices de aridez

Se han propuesto numerosos índices numéricos para cuantificar el grado de sequedad de un clima en un lugar determinado, y por lo tanto definir las zonas climáticas. Los índices de aridez fueron revisados por Walton (1969) y Stadler (2005). Hay una falta de acuerdo sobre los métodos utilizados para delinear los límites exactos entre las tierras que tienen diferentes niveles de aridez, aunque hay un acuerdo sobre la ubicación general de las regiones áridas (Agnew, 1992). Los índices de aridez inherentemente incluyen un elemento de la circularidad en la que están calibrados contra patrones de aridez conocidos. Por ejemplo, el desierto de Atacama en el norte de Chile es ampliamente reconocido como el desierto más árido del mundo. Por lo tanto, los umbrales numéricos para la categoría extremadamente áridos o hiperárido para los índices de aridez se basan en los valores de los índices para el desierto de Atacama y áreas similares (Maliva, 2012). Desde una perspectiva práctica para la gestión del agua, los índices de aridez no tienen mucha relevancia. Por lo general es evidente que una región árida bajo investigación es de hecho árida. Tampoco hay una razón de peso para preferir un índice a otro con respecto a la gestión del agua. Los índices de aridez tienen mayor valor para el seguimiento de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos locales, si están disponibles para el mapeo de los cambios locales en los valores de los índices en el tiempo de datos suficientemente precisos. El índice de aridez más simple se fundamenta únicamente en la precipitación. Una definición de las precipitaciones se basa en que una región árida recibe menos de 10 pulgadas o 250 mm de precipitación por año. Este criterio de aridez fue utilizado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 2007. Regiones semiáridas se definen comúnmente por las precipitaciones anuales de entre 10 y 20 pulgadas (250 y 500 mm) (Maliva, 2012).

$$AI = \frac{P}{ET_p}$$

**Figura 17.** Índice de aridez de la UNESCO 1979.

El índice de aridez UNESCO 1979 Aridex Index (AI) se basa en la relación de precipitación anual (P) y las tasas de evapotranspiración potenciales donde, ETP se calcula utilizando la fórmula de Penman (1948). El sistema de la UNESCO (Figura 17) es atractivo, ya que es conceptual y operativamente sencillo y se basa únicamente en los dos parámetros principales que definen la aridez. Regiones áridas tienen bajos niveles de P y altas tasas ETP y los valores muy bajos de AI. UNESCO (1979) propone una clasificación de las zonas climáticas basado en el índice AI, en el que las regiones áridas se definen por un índice de menos de 0.20 (Tabla 4). Las versiones alternativas de la clasificación utilizan un valor de 0,05 AI por el límite entre las regiones hiperáridas y áridas (Maliva, 2012).

**Tabla 4.** Clasificación de la aridez UNESCO 1979.

Clasificación	Índice de aridez
Hiper-árido	$AI < 0.03$
Árido	$0.03 < AI < 0.20$
Semiárido	$0.20 < AI < 0.50$
Subhúmedo	$0.50 < AI < 0.65$
Seco	

Los datos sobre las tasas de ETP locales pueden no estar disponibles, lo que limita el uso del índice de la UNESCO. El índice de aridez De Martonne (1926) ( $A_m$ ) en su lugar utiliza la temperatura como un remplazo para ETP de la siguiente manera (Figura 18 y tabla 5).

$$A_m = \frac{P}{T + 10}$$

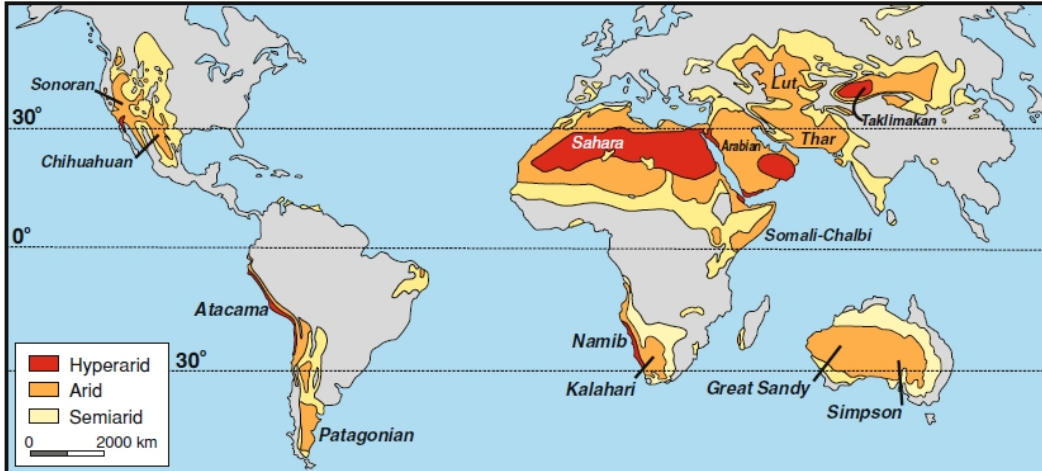
**Figura 18.** Índice de aridez de De Martonne 1926.

Donde, P (mm) es la precipitación media anual y T (° C), la temperatura media anual. La ecuación es apropiada para temperaturas superiores a -9,9°C. El índice de aridez De Martonne disminuye (se aproxima a cero) con el aumento de la aridez (Maliva, 2012). Al adicionar una constante al denominador se evitan los valores negativos. El valor que se suma a la temperatura del denominador es el 10, valor que se cambia por el siete en la propuesta de delimitación de zonas húmedas y secas de Köppen. Según De Martonne el índice también se puede aplicar para cada mes. La fórmula es similar a la anterior, pero con los valores medios mensuales y multiplicados por doce (Almorox, 2003).

**Tabla 5.** Clasificación de la aridez De Martonne 1926.

Valor de $A_m$	Zona
0 - 5	Desiertos (Hiperárido)
5 - 10	Semidesierto (Arido)
10 - 20	Semiárido de tipo mediterráneo
20 - 30	Subhúmeda
30 - 60	Húmeda
> 60	Hiperhúmeda

El sistema de clasificación de Thornthwaite (1948), y las variaciones de los mismos, también se utiliza comúnmente para mapear la distribución de las tierras áridas no polares. Meigs (1953) elaboró un mapa de la distribución de las regiones áridas no polares de la UNESCO sobre la base de la clasificación de Thornthwaite, que sigue siendo ampliamente citado (Figura 18). Peveril Meigs generó una clasificación de los lugares desérticos alrededor del mundo dividiéndolas en tres categorías en función de la cantidad de precipitación de la cual disponían. En este sistema, hoy ampliamente aceptado, los terrenos extremadamente áridos tienen por lo menos 12 meses consecutivos sin lluvias, las tierras áridas tienen menos de 250 milímetros de precipitación anual, y las tierras semiáridas tienen una precipitación anual media de entre 250 y 500 milímetros (Maliva, 2012).



**Figura 19.** Mapa de la distribución de las tierras áridas no polares Meigs 1953, tomado de (Maliva, 2012).

### 2.1.3 Causas de la aridez

Las precipitaciones se producen cuando el aire húmedo se enfría ya sea a través del proceso de ascensión, mezcla, radiación o enfriamiento de contacto. Los procesos que conducen a la aridez tienden a evitar dicho enfriamiento mediante el mantenimiento de la estabilidad del aire, creando inversiones de temperatura, o mediante el calentamiento de la atmósfera. El aire descendente tiende a ser más cálido, lo que disminuye su humedad relativa y aumenta su sequedad. La mayoría de las tierras áridas se encuentran ubicadas en los trópicos y por lo tanto, reciben cantidades sustanciales de energía por radiación solar, dicha energía pueden ser utilizadas en calentar el ambiente, generación de vientos, o ser utilizada para la evaporación. (Maliva, 2012). Hay cuatro causas principales de la aridez regional (Thompson 1975; Agnew, 1992):

1. Alta presión: el aire caliente se eleva en el ecuador, se mueve hacia los polos, y luego desciende en los subtropicos en alrededor de 20 a 30° latitud norte y sur y cerca de la zona de convergencia intertropical. La compresión y calentamiento de la masa de aire descendente conduce a la sequedad en conjunto con las condiciones atmosféricas estables (por ejemplo, el desierto del Sahara). Este patrón de circulación atmosférica se conoce como célula de Hadley (Maliva, 2012).
2. Vientos continentales: Los vientos que soplan a través del interior continental tienen menos posibilidades de absorber la humedad y son bastante estables con baja humedad (por ejemplo, SW Asia, Oriente Medio). No es la distancia absoluta de los océanos la que es importante, sino más bien la distancia desde el océano a lo largo de las trayectorias del flujo de corriente de aire húmedo (Walton, 1969).
3. Efecto de sombra de lluvia: El enfriamiento es forzado por la circulación de aire en lo alto de las cordilleras o montañas provocando la precipitación y la pérdida de humedad. El aire que desciende en el lado de sotavento gana más calor a una altitud dada en comparación con el lado de barlovento debido a las mayores tasas de caída adiabática (tasa de cambio de temperatura con la altitud) de aire seco en comparación con el aire húmedo o saturado. Los lados de barlovento de las cadenas montañosas pueden tener

altas tasas de precipitación, mientras que los lados de sotavento (a una distancia geográfica relativamente corta) pueden tener condiciones áridas o semiáridas (por ejemplo, el norte de las Montañas Rocosas EE.UU.) (Maliva, 2012)

4. Corrientes oceánicas frías: las corrientes oceánicas frías cerca de la tierra pueden enfriar la baja atmósfera, pero el aire más caliente en altura crea una inversión térmica que impide el ascenso de aire y por lo tanto la precipitación. A medida que el aire fresco se mueve desde el interior se calienta y como resultado su humedad disminuye (por ejemplo, Costa de Perú, Omán, y Namibia) (Maliva, 2012).

La aridez es principalmente el resultado de la geografía y la topografía a gran escala o a un nivel regional en donde persisten patrones en la circulación atmosférica y oceánica. La causa de la aridez general no es pertinente para la gestión de las aguas subterráneas locales. La aridez y la escasez de agua asociada, es en el largo plazo, una condición hidrológica y climática con la que las poblaciones locales deben adaptarse independientemente de su causa. Sin embargo, la causa de la aridez es significativa en el contexto del cambio climático global, lo que puede afectar los patrones de circulación atmosférica y oceánica mundial. Por ejemplo, el calentamiento global puede dar lugar a una expansión o cambio de las células de Hadley, lo que podría aumentar el alcance y cambiar las posiciones de las zonas secas subtropicales (Maliva, 2012).

### **2.1.5 Suelos de regiones áridas**

Los suelos son el resultado de la erosión de las rocas, a partir de la acción del sol, el viento y el agua. Los suelos de los desiertos cálidos se ubican en un orden con un nombre descriptivo. Se clasifican como Aridisoles en la taxonomía de suelos de Natural Resources Conservation Service (USDA) y Arenosoles o Regosoles en el esquema de la FAO. Los Aridisoles son los más generalizados de todos los tipos de suelo y ocupan más del 19 por ciento de la superficie terrestre cerca de 10 millones de millas cuadradas (26 millones de km<sup>2</sup>). Estos son muy diferentes de los Inceptisoles (Crisoles), ya que es la falta de agua la que restringe el crecimiento de las plantas en los desiertos cálidos, no las temperaturas extremas. Hay vegetación pero es escasa y el suelo contiene poca materia orgánica. Los desiertos son lugares donde el suelo seco con mucho viento transporta el polvo de un lugar a otro, enterrando los restos de plantas. A diferencia de los Inceptisoles de la tundra, los Aridisoles pueden ser restablecidos. En muchos lugares contienen nutrientes para las plantas, por lo que si se suministra agua es posible cultivar. Con el cultivo sostenido en el tiempo maduran en suelos que son más parecidos a los de las praderas de la sabana, clasificado como Molisoles en la taxonomía de suelos (Allaby, 2008). Los suelos de zonas áridas y semiáridas pueden tener una profundidad muy variable, con texturas desde arenosas hasta arcillosas y con pH alcalinos y fertilidad variable. En estas zonas es frecuente la presencia de suelos con perfiles incipientes o poco desarrollados. Los suelos de este tipo se caracterizan por acumulación de sales solubles en el perfil, aunque la profundidad, distribución, cantidad y tipo de sales acumuladas están condicionadas por la composición del agua que alcanza el perfil y los flujos que se producen dentro del mismo. Para suelos con un mismo grado de desarrollo, la profundidad a la que se encuentra la máxima acumulación de sales está directamente relacionada con los flujos de agua descendentes. Otra característica importante de los suelos de zonas áridas y semiáridas es la presencia de un horizonte cálcico formado por acumulación de carbonato que, en algunos casos, puede llegar a formar una costra de muy baja permeabilidad (González-Rebollar, 2010). La tasa de infiltración de estos horizontes cálcicos suele estar inversamente relacionada con el contenido en carbonato de estos horizontes (Gile, 1961). De forma general, la productividad de estos suelos depende fuertemente de su capacidad de retención de agua, que tiende a aumentar con la profundidad y el contenido en materia orgánica. También los suelos arenosos presentan

una menor capacidad de retención de agua frente a los arcillosos. La textura de la capa más superficial del suelo condiciona fuertemente el movimiento del agua en la zona no saturada. Las texturas finas favorecen el almacenamiento de agua y la retienen infiltrada cerca de la superficie, aumentando así la conductividad hidráulica y la disponibilidad para la evapotranspiración (González-Rebollar, 2010). Texturas más gruesas favorecen la penetración del agua hacia zonas profundas, llegando a alcanzar profundidades por debajo de la zona radicular pero, cuando el contenido en agua desciende, la conductividad hidráulica disminuye bruscamente, dificultando el flujo ascendente de agua. La heterogeneidad y la horizonación del suelo son también factores que condicionan el movimiento del agua. La heterogeneidad textural está presente a pequeña y gran escala, pero esta heterogeneidad local puede ser muy importante en suelos de zonas áridas y semiáridas donde gran parte del agua es adsorbida por la superficie de las partículas sólidas y donde gran parte del flujo de agua ocurre en forma de vapor (González-Rebollar, 2010).

El contenido en materia orgánica y la estabilidad de los agregados del suelo disminuyen generalmente con la aridez. Como consecuencia, las tasas de infiltración también disminuyen, aumentando la fracción de escorrentía superficial. En regiones de extrema aridez la cobertura vegetal se reduce a pequeñas zonas dispersas y, en la mayor parte de la superficie del suelo, la materia orgánica es prácticamente inexistente. La superficie del suelo es el primer punto de contacto de la lluvia, y las propiedades físicas y químicas del material superficial desempeñan un papel primordial en la generación de escorrentía. Con el aumento en aridez también aumenta la presencia de rocas en superficie. Además, las costras superficiales pueden reducir significativamente las tasas de infiltración (Yair, 1990; Solé-Benet et al., 1997) y, en ocasiones, se comportan como superficies hidrófobas acentuando la escorrentía. La escasa vegetación en este tipo de zonas hace que el suelo sea más vulnerable a los impactos por gotas de lluvia y viento, lo que propicia a su vez el arrastre de partículas en el espacio poroso del suelo, convirtiéndolo así en más denso, con una mayor dureza y una menor capacidad de absorción. Este efecto se conoce como "pavimento del suelo" y agrava aún más la problemática de conservación de agua del suelo en las zonas áridas y semiáridas. Durante eventos de precipitación de alta intensidad las gotas de lluvia dispersan la matriz del suelo y forman una superficie estable de menor permeabilidad. La mayor parte de la escorrentía en suelos de textura fina en regiones áridas y semiáridas es debida a este encostramiento (Lange, 2003). El sellado de la superficie del suelo, además de favorecer la escorrentía superficial, incrementa la erosión y la pérdida de material fino y de nutrientes. Una vez erosionado, el suelo queda menos útil para soportar vegetación y es más susceptible a futuras alteraciones por el agua y el viento. Esta degradación presenta, por tanto, efectos de retroalimentación que pueden incluso dar lugar a la pérdida del recurso suelo (González-Rebollar, 2010).

## 2.1.6 Macronutrientes en suelos áridos

El nitrógeno (N), ya que se produce en la atmósfera no puede ser utilizado por las plantas vasculares u otros organismos como una fuente de nutrientes. El dinitrógeno gaseoso (N<sub>2</sub>) debe ser reducido o "fijado" por el amoníaco (NH<sub>3</sub>). Las tasas de fijación de nitrógeno en los ecosistemas de tierras secas se suponen que son bajas debido a las altas temperaturas y la baja humedad del suelo, proporcionando condiciones menos que óptimas para la fijación de N que se produzca en estos ambientes (Marschner, 2007). Esta hipótesis ha sido apoyada por el uso de un enfoque de balance de masas para identificar niveles de N en el ecosistema; los resultados del modelo biogeoquímico sugieren que los niveles de N del suelo pueden ser completamente explicados por la deposición atmosférica de solo N, lo que resulta en poco o nada de entradas a través de la fijación de los ecosistemas de tierras secas (Cleveland et al., 1999). En contraste, las mediciones de campo de la fijación de N pueden ser bastante altas cuando las condiciones son

óptimas. La duración de tiempo durante el cual se producen las condiciones óptimas, está limitada, resultando en una baja fijación de N<sub>2</sub> anualmente. Muchas plantas de tierras secas tienen nódulos de las raíces que contienen bacterias o actinomicetos fijadores de N<sub>2</sub>. Las bacterias que se encuentran en las plantas leguminosas son o *Rhizobium* o *Bradyrhizobium spp.* (Farnsworth et al 1976; Whitford 2002). En ecosistemas de zonas áridas y semiáridas, las principales especies de plantas fijadoras de N<sub>2</sub> incluyen los arbustos de Acacia, Prosopis, *Pterocarpus* y *Pericopsis* y la herbácea *Lupinus*, *Dalea*, el *Astrágalo* y *Lotus*. Muchas plantas de secano no leguminosas también tienen nódulos. Estos nódulos más a menudo están ocupados por el actinomiceto *Frankia*. Estas familias de plantas incluyen, pero no se limitan a *Asteraceae*, *Scrophulariaceae*, *Zygophyllaceae*, *Poaceae*, *Cactaceae*, *Krameriaceae*, *Casuarinaceae*, *rosáceas* y *Rhamnaceae* (Farnsworth et al 1976; Redell et al., 1991).

El fósforo (P) presenta una limitación a las plantas en las zonas áridas debido al origen geológico de P en los ecosistemas terrestres y al hecho de que minerales secundarios en los suelos regulan la disponibilidad y esté es controlado geoquímicamente. Con un clima cálido la química actúa sobre el material parental para formar el suelo, el fósforo es lixiviado y en el sistema puede perderse o permanecer en el suelo, ya sea ocluido o no ocluido, por la presencia de hidróxidos de Al y Fe o CaCO<sub>3</sub>. La presencia de estos minerales secundarios en los suelos de las tierras secas, CaCO<sub>3</sub>, en particular, influye fuertemente en la disponibilidad de P (Cross, 2001; Lajtha, 1988). Las pérdidas por erosión de P son importantes en las regiones áridas y semiáridas y han demostrado que la erosión eólica puede reducir drásticamente la concentración de P disponible en los suelos superficiales (Okin et al. 2001). Estudios de escorrentía (Schlesinger et al., 1999, 2000) han demostrado que la escorrentía no es una causa importante de la pérdida de P de los suelos. La medida en que P sigue estando disponible para su absorción por los organismos depende de las propiedades químicas del suelo, que a su vez se determinan por el grado de la intemperie, el desarrollo del suelo y la erosión (Marschner, 2007).

El potasio (K) es un nutriente esencial para las plantas. Las plantas requieren una cantidad bastante grande de K y con frecuencia pueden usar más que lo disponible en los suelos (Troeh, 1993). La mayoría de K se deriva de la moscovita, micas, biotita, los feldspatos, ortoclasa, microclina y depósitos de evaporación que se encuentran en climas de tierras secas (Day, 1993; Troeh, 1993). En el suelo, K se produce generalmente en estructuras minerales como iones hidratados en solución o adsorbidos en los sitios cargados negativamente en arcillas y materia orgánica. Los iones hidratados de K son del mismo tamaño que los iones de amonio y se mantiene con aproximadamente la misma fuerza, mientras que se mantienen débilmente en relación con el calcio (Ca) y los iones de magnesio (Mg). Por lo tanto, los iones K son fácilmente intercambiables. Las raíces de las plantas pueden obtener fácilmente K si llegan al sitio de absorción; Sin embargo, K, se mueve muy lentamente a través de los suelos. El potasio es más soluble en suelos calcáreos que en suelos no calcáreos, debido al efecto de ácido carbónico en los suelos calcáreos. También se intercambia más fácilmente con otros cationes en suelos calcáreos en comparación con los suelos no calcáreos. En general, K no se lixivía fácilmente de los suelos, incluso durante largos períodos de tiempo. En las zonas áridas, K se acumula en la superficie debido a un transporte hacia arriba por las plantas y acumulación de K en las mismas plantas y en las plantas muertas (Jobbagy, 2001; Schlesinger, 1998).

### 2.1.7 Recurso agua en zonas áridas

Gran parte del agua que está disponible para las personas que viven en regiones de tierras secas se encuentra en grandes ríos que se originan en las zonas de mayor altitud. Los recursos de agua subterránea también pueden estar disponibles para el desarrollo de estas comunidades. Sin embargo, la recarga relativamente limitada de los recursos de agua subterránea depende en gran medida de la cantidad, intensidad y duración de la lluvia, y las propiedades del suelo, incluyendo capacidad de infiltración y las características de retención de agua en el suelo, lo que también influye en la cantidad de escorrentía superficial, gran parte de la precipitación se pierde por evapotranspiración, y como resultado, el agua subterránea se recarga sólo a nivel local por la filtración a través del perfil del suelo. Eventos superficiales de escorrentía, almacenamiento, la humedad del suelo y la recarga de acuíferos en las regiones secas son generalmente más variables y menos fiables que en las regiones más húmedas. El agua subterránea en las zonas áridas se utiliza con frecuencia a tasas que superan la recarga. El agua disponible para uso en muchas regiones con tierras secas puede ser afectada por la salinidad. Los problemas de salinidad son más generalizados y agudos en las tierras secas que en otras regiones (Armitage 1987). Aunque la mayoría de los organismos del suelo contienen algunas sales solubles, es sólo cuando las acumulaciones de sales alcanzan un nivel mayor que son perjudiciales para la supervivencia y el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, las plantas "definen un umbral" de la salinidad del suelo en términos de sus tolerancias relativas. La mineralización de las aguas subterráneas es también un problema común. Las causas de la mineralización incluyen la evaporación de las superficies de agua y aguas subterráneas poco profundas, salmueras fósiles de antiguos lagos y lagunas, y sales transportadas por el aire depositado por precipitación y en forma de lluvia seca (Ffolliott, et al 2003). Los suelos de regiones áridas y semiáridas muestran poca conectividad hidrológica, lo que aumenta la heterogeneidad espacial en la distribución del agua dentro, incluso, de cuencas o zonas donde la topografía podría indicar una mayor conectividad (Puigdefabregas et al., 1998). La transferencia de agua de unas zonas a otras suele ser bastante lenta, pues ocurre fundamentalmente por medio de flujo no saturado y sólo en ocasiones por flujos superficiales. En la actualidad existe un buen número de dispositivos para determinar el contenido en agua de los suelos basados en técnicas muy diferentes. De forma general, estas técnicas pueden agruparse en cinco grupos: gravimétricas, tensiométricas, atenuación de neutrones, disipación de calor y técnicas dieléctricas (González-Rebollar, 2010).

## 2.2 INTERACCIONES DE LA VEGETACIÓN EN ZONAS SECAS

Pocas plantas son capaces de vivir en el clima del desierto. Estas incluyen plantas con raíces, tallos y hojas que son modificados para maximizar la eficiencia con la que usan agua. La sequía sucede, pero no hace daño a estas, ya que necesitan muy poca agua. Las plantas del desierto han evolucionado formas para evitar la germinación en el momento equivocado. En el desierto existen dos tipos: las que germinan en invierno y las que germinan en verano. La germinación se activa en parte por la temperatura. Las temperaturas cálidas afectan a los germinadores de verano y de invierno. Los germinadores reaccionan a temperaturas frías, cada tipo de semilla responde sólo cuando la temperatura supera un determinado umbral. Con el fin de germinar las semillas deben estar húmedas por lo que la humedad proporciona la otra parte del gatillo que detona este mecanismo, pero la humedad puede desaparecer rápidamente (Allaby, 2008). La conservación del agua es importante para los organismos del desierto, sus adaptaciones fisiológicas y de comportamiento para la adquisición de agua para el manejo eficiente han sido bien estudiados. Estas interesantes adaptaciones son bastante variadas. Al igual que los gastos de energía y calor, los gastos de agua deben equilibrarse; las pérdidas deben ser reemplazadas por las ganancias. Para esto las plantas utilizan mecanismos de adquisición de agua, como estrategias de enraizamiento. Las plantas del desierto por lo general pueden invertir

mucho más en sistemas de raíces que plantas de zonas húmedas; un estudio demostró que los arbustos perennes en el desierto asignan casi el 90 por ciento de su biomasa a los tejidos subterráneos (Caldwell, 1975), mientras que las raíces aparentemente representan una fracción mucho menor (sólo el 10 por ciento) de la biomasa del cultivo en pie de un bosque méxico de madera dura. Los cactus son la más famosa de todas las plantas de los desiertos americanos. Todos los cactus son plantas y tienen raíces poco profundas que absorben agua rápidamente siempre que esté disponible. Estas características permiten a algunas especies vivir como epifitas, que son las plantas que crecen en la superficie de otras plantas. Las plantas suculentas almacenan agua en sus tejidos, y los cactus utilizan sus tallos para este fin. Algunas especies tienen hojas verdaderas, pero por lo general son pequeñas y se pueden desprender con bastante rapidez. Los cactus desarrollan la fotosíntesis en sus tallos. Aunque las estructuras hinchadas en forma de peras espinosas se parecen a hojas, de hecho, son los tallos conocidos como almohadillas donde se da el almacenamiento de agua. Los tallos hinchados o las hojas de plantas suculentas tienen un área de superficie más pequeña en relación con el volumen de los tallos o las hojas de otras plantas. La relación de área superficial al volumen ayuda a las plantas suculentas para un mejor sobrevivir, debido a que la cantidad de humedad que pueden contener es directamente proporcional a su volumen, mientras que la cantidad de calor que pueden absorber y agua que pueden perder por transpiración es directamente proporcional a su superficie. La maximización del volumen y el reducir al mínimo el área de superficie aumenta la cantidad de humedad que pueden almacenar mientras que reduce la velocidad a la que se pierde a medida que la planta es calentada. Al igual que muchas plantas del desierto, los cactus tienen espinas (Allaby, 2008).

## 2.2.1 Teoría de islas

Mc Arthur y Wilson (1967) propusieron que el número de especies en una isla representa un equilibrio dinámico entre tasas opuestas de migración y extinción, dos procesos recurrentes que mantienen la riqueza de especies relativamente constante pese a cambios en su composición. Esta teoría dice que las islas (hábitats insulares) de mayor tamaño y más cercanas a la fuente de especies (el "continente") tendrán un mayor número de especies que aquellas más pequeñas y más alejadas. La teoría asume también que las poblaciones serán de mayor tamaño en las islas de mayor área, y que por tanto su riesgo de extinción será más reducido. Por otro lado, las islas más cercanas al "continente" tendrán una mayor probabilidad. Mc Arthur & Wilson asumen que el tamaño de la isla tendrá un efecto sólo sobre la tasa de extinción, dado que en una isla más pequeña, al ser las poblaciones más pequeñas estarán más sujetas a extinción. La misma lógica puede usarse para suponer que las tasas de inmigración estarán fundamentalmente influenciadas por el aislamiento de la isla. Independientemente de la habilidad de dispersión del organismo, cuanto más alejada esté la isla de la fuente de especies, menos probable será que estas especies lleguen a ella. El modelo explica que el número de especies aumenta con el área de la isla y disminuye con su aislamiento, y que no existen eventos de inmigración y extinción aislados, sino que el recambio es constante. Propusieron que el número de especies en una isla representa un equilibrio dinámico entre tasas opuestas de migración y extinción, dos procesos recurrentes que mantienen la riqueza de especies relativamente constante pese a cambios en su composición (Newmark, 1987). La teoría de biogeografía de islas es de gran importancia en conservación, ya que se puede establecer una analogía entre islas y áreas naturales, ya que éstas serían como "islas rodeadas de mar hostil". El pequeño tamaño de las reservas conlleva que haya menos ambientes diferentes y que las poblaciones pequeñas sean más vulnerables. El aislamiento dificulta la llegada de nuevas especies y el restablecimiento de poblaciones extinguidas. Un adecuado conocimiento de las relaciones especie-área es de gran importancia en los estudios de evaluación y de inventario de la riqueza biológica de una determinada región (Newmark, 1987).



## 2.2.2 Isla de fertilidad o de recursos

Un fenómeno común de los patrones de vegetación natural en los desiertos es la denominada isla de los recursos, una función compleja de la acumulación de un micro hábitat. Muchas plantas atenúan las condiciones adversas ambientales a las que están sometidas modificando su hábitat, provocando cambios en el microclima y en las propiedades del suelo lo que puede beneficiar a la vegetación en el futuro. Los ecosistemas de tierras secas tienen una distribución muy heterogénea de los recursos, con mayores concentraciones de nutrientes y densidades microbianas en los sitios con vegetación que en los suelos desnudos. Este proceso de hábitat "Ingeniería" facilita el establecimiento de otras especies de plantas, como resultado de la riqueza de especies se incrementa bajo el dosel de algunos arbustos y árboles. Una asociación de plantas ocurre entre árboles, arbustos, pequeñas leguminosas y suculentas del desierto. En concreto, estas plantas leguminosas crean, dentro de la zona de las raíces y ramas colgantes, ligeros montículos que forman a partir de la deposición y estabilización de las partículas del suelo transportadas por el viento bajo el dosel. La sombra, nutrientes y materia orgánica también contribuyen a este proceso de estabilización. Estos montículos son llamados islas de recursos o islas de fertilidad (García, 1970; Burquez, 1994; Garner, 1989; Nabhan, 1994; Suzan et al. 1994, 1996; West et al. 2000). Con el tiempo, los suelos bajo arbustos y árboles acumulan recursos a expensas del suelo desnudo y los espacios abiertos también estimulan la actividad microbiana. Esto conduce a la mejora de la vegetación en estas áreas limitadas. Las asociaciones de plántulas con el establecimiento de plantas nodrizas son un ejemplo del comensalismo en el que las plantas semillero se benefician del micro hábitat creado por las plantas nodrizas, sin ningún efecto adverso para esta última (Bashan, 2010).

## 2.2.3 Evolución convergente y evolución paralela

El Ocotillo (*Fouquieria splendens*) que también se conoce como coachwhip o cactus vid, es un arbusto que crece de forma natural en los desiertos rocosos del suroeste de los Estados Unidos y México. *Euphorbia splendens* es otra planta alta, espinosa que pierde las hojas y lleva brillantes flores rojas. Es conocida como la corona de espinas, y crece de forma natural en Madagascar, pero se cultiva como planta de interior en otras partes del mundo. Pertenecen a la familia de euforbio (*Euphorbiaceae*). A pesar de que son muy similares, estas dos plantas no están relacionadas entre sí. A pesar de ser llamada el cactus vid, ocotillo no es un cactus. Pertenecen a la familia *Fouquieriaceae*, junto con el árbol boojum (*Idria columnaris*) se asemejan a los cactus entre las que se desarrolla. Muchas euforbias también se parecen a los cactus, aunque el *Euphorbiaceae* y *Cactaceae* son bastante distintas, y existen profundas diferencias fisiológicas entre las dos familias. Tales similitudes entre especies no relacionadas son comunes, especialmente en los desiertos. Algunas se producen porque la evolución tiende a repetirse, por lo que las estructuras exitosas aparecen de forma independiente en las líneas evolutivas muy distantes entre sí. Los ojos son el ejemplo más obvio. Dado que estos grupos se separaron de un ancestro común y ciego, los ojos han evolucionado de forma independiente muchas veces, en los insectos, moluscos, otros animales invertebrados y vertebrados. Otras similitudes evolucionan porque hay un límite al número de maneras en las que es posible que un organismo se adapte a su ambiente. En consecuencia, organismos no relacionados tienden a evolucionar soluciones similares a problemas idénticos. Es debido a esto que en los desiertos actuales se encuentran pocas soluciones evolutivas disponibles y han llevado a tantas semejanzas cercanas entre plantas y animales. Normalmente, cuando dos especies evolucionan a partir de un ancestro común se convierten en cada vez más disímiles en generaciones posteriores. Esto se denomina evolución divergente, o divergencia evolutiva. Dos flechas divergentes se pueden utilizar para representarla, como la figura 20. Donde surgen similitudes físicas entre los

organismos que no están estrechamente relacionados, el proceso se llama evolución convergente, o simplemente la convergencia. Los antepasados de los organismos modernos pueden no tener un parecido entre sí, pero sus descendientes parecen muy similares. Dos flechas convergentes ilustran el proceso, el punto es que aunque las flechas convergen, no se encuentran. Las especies siguen siendo bastante distintas, y su similitud es superficial, que surge simplemente del hecho de que viven de manera similar en circunstancias similares. Si las plantas o animales similares pertenecen a distintas especies pero estrechamente relacionadas, el proceso se denomina evolución paralela. La distinción es algo arbitraria, ya que todos los organismos vivos están relacionados por conexiones en algún momento de su ascendencia. Por lo tanto, la relación depende del tiempo que ha transcurrido desde que se convirtieron en especies particulares distinguibles de su ancestro común y entre sí. La evolución paralela se produce cuando dos especies tienen un hábitat o ambientes similares y mantienen formas de vida similares; las similitudes en el estilo de vida significan que las especies se parecen entre sí físicamente. En este ejemplo las dos flechas son paralelas (Allaby, 2008).

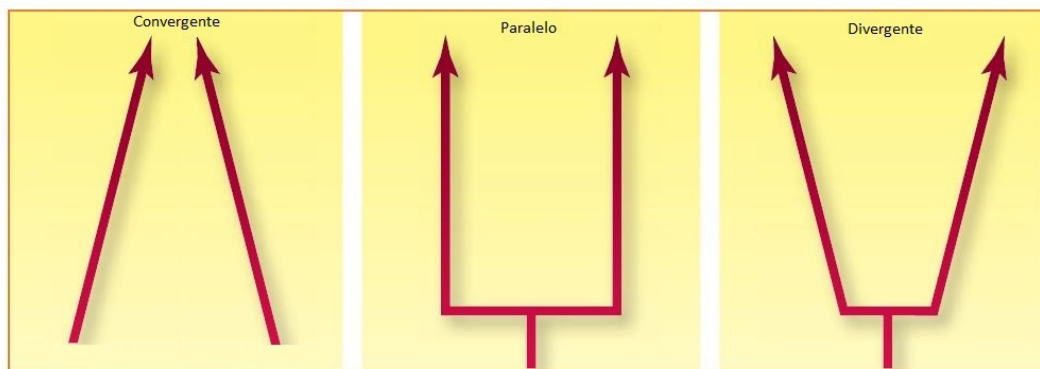


Figura 20. Tipos de desarrollo evolutivo tomado de: (Allaby, 2008).

## 2.3 ENFOQUE GEOPEDOLÓGICO Y FISIAGRÁFICO

La geomorfología es ante todo una ciencia de observación, persiguiendo la identificación y separación de paisajes a partir de mapas topográficos, modelos digitales de elevación o de terreno, documentos de sensoramiento remoto permitiendo visión estereoscópica, pero principalmente por lectura de los rasgos fisiográficos en el campo. Las geoformas pueden ser percibidas por visión humana o sensores artificiales, porque tienen una apariencia fisionómica en la superficie de la tierra (geopaisaje). La fisiografía describe este aspecto externo correspondiente al componente epigeo de las geoformas. Gracias a su expresión paisajística, las geoformas son los elementos más directamente estructurantes del terreno, más que cualquier otro objeto o rasgo natural. Inclusive un observador no-científico puede advertir que cualquier porción de la corteza terrestre tiene una estructura determinada por el relieve, que permite subdividirla en elementos y componentes. Las veces que una superficie de terreno puede ser subdividida depende del nivel de percepción usado para esto. Aunque el concepto de nivel de percepción es subjetivo cuando se usa el ojo humano, el mismo ayuda a jerarquizar los componentes estructurales de una superficie de terreno (Zink 2012). El enfoque geopedológico pone énfasis en la lectura del paisaje en el campo y desde documentos de sensoramiento remoto con fines de identificar y clasificar las geoformas, como preludeo a su mapeo junto con los suelos que albergan a la interpretación de las relaciones genéticas entre geoformas y suelos.

Como tal, geopedología está emparentada con el concepto de patrón y estructura de la cobertura pedológica desarrollado por Fridland (1974) y retomado por Hole & Campbell (1985), pero con énfasis explícito en el contexto geomorfológico como factor esencial de formación y distribución de los suelos (Zink 2012).

La Geopedología es un enfoque dirigido al levantamiento de suelos, combinando criterios geomorfológicos y pedológicos, para establecer unidades de mapeo y analizar la distribución de los suelos en el paisaje. La geomorfología provee los contornos de las unidades de mapeo (el conteniente), mientras que la pedología suministra los componentes taxonómicos de las unidades de mapeo (el contenido). Por lo tanto, las unidades de un mapa geopedológico son más que las unidades cartográficas de un mapa convencional de suelo, ya que contienen también información sobre el contexto geomorfológico en que se encuentran y se han desarrollado los suelos. En este sentido, la unidad geopedológica es un equivalente aproximado del concepto de paisaje de suelo, o *soilscape* (Buol et al., 1997), con la particularidad que el paisaje es básicamente de naturaleza geomorfológica. Esto se refleja en la leyenda del mapa geopedológico, la cual combina geoformas como entradas a la leyenda y unidades taxonómicas de suelo como componentes. El enfoque geopedológico fue formalizado como texto de referencia bajo el entitulado de *Physiography and Soils* en el marco de un programa de postgrado para formar especialistas en levantamiento de suelos en el International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), ahora Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, en Enschede, Países Bajos (Zinck, 1988). Durante un período de más de 20 años se formaron así geopedólogos originarios de una variedad de países de América Latina, Africa, Medio-Oriente, y Sureste Asiático, que contribuyeron a divulgar y aplicar el método geopedológico en sus respectivos países. En estos tiempos, el ITC participaba también en proyectos de inventario de suelos en el marco de programas internacionales de cooperación para el desarrollo. Esto a su vez ha contribuido a difundir el modelo geopedológico en una amplia parte del mundo intertropical. En ciertos países, este modelo ha recibido el apoyo de organismos oficiales para su implementación en programas de inventario de los recursos naturales y de ordenamiento ecológico del territorio. La aplicación de la geomorfología al inventario de suelos requiere una taxonomía de las geoformas de tipo jerárquico para ser utilizada a diversos niveles categóricos de acuerdo al grado de detalle del inventario y de la cartografía de suelos (Tabla 6). Se utiliza la palabra geoforma como término genérico a todos los niveles taxonómicos, mientras que forma de terreno se utiliza para designar el nivel inferior del sistema de clasificación. El concepto de geoforma incluye a la vez el modelado/relieve y las formaciones superficiales. La palabra forma de tierra como traducción literal de *landform* se presta a confusión, porque se utiliza con significados diferentes en geomorfología, ecología de paisajes, y evaluación de tierras, entre otros (Zink 2012).

**Tabla 6.** Sistema taxonómico de las geoformas (Zinck, 1988).

Nivel	Categoría	Concepto genérico	Definición
6	Orden	Geoestructura	Extensa porción continental caracterizada por su macro-estructura geológica (p.e. cordillera, geosinclinal, escudo)
5	Suborden	Ambiente morfo-genético	Amplio tipo de medio biofísico originado y controlado por un estilo de geodinámica interna y/o externa (p.e. estructural, deposicional, erosional, etc.)
4	Grupo	Paisaje geomorfológico	Gran porción de terreno caracterizada por sus rasgos fisiográficos; corresponde a una repetición de tipos de relieve similares o a una asociación de tipos de relieve disimiles (p.e. valle, altiplanicie, montaña, etc.)
3	Subgrupo	Relieve/modelado	Tipo de relieve originado por una determinada combinación de topografía y estructura geológica (p.e. cuesta, horst, etc.).  Tipo de modelado determinado por específicas condiciones morfoclimáticas o procesos morfogenéticos (p.e. glacis, terraza, delta, etc.).
2	Familia	Litología/facies	Naturaleza petrográfica de las rocas duras (p.e. gneis, caliza, etc.) u origen/naturaleza de las formaciones no-consolidadas de cobertura (p.e. periglaciario, lacustre, aluvial, etc.)
1	Subfamilia	Forma de terreno	Tipo básico de geoforma caracterizado por una combinación única de geometría, historia y dinámica.

### 2.3.1 Sistema CIAF de clasificación fisiográfica

El Centro de investigación y desarrollo en información geográfica (CIAF), tiene su origen en base al interés de los Gobiernos de Colombia y del Reino de los Países Bajos, en establecer un instituto que ofreciera entrenamiento y educación avanzada en el uso y aplicación de las fotografías aéreas; con bases comparativas y compatibles con el International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences – ITC de Holanda; a profesionales, investigadores y profesores universitarios, vinculados al desarrollo de los recursos naturales de los países latinoamericanos. A finales del año 1967, se iniciaron las labores de entrenamiento por parte de un selecto grupo de profesores holandeses, a quienes se le sumaron posteriormente profesionales colombianos entrenados en el ITC, en un proceso gradual de transferencia tecnológica que se prolongó, en una primera etapa, por espacio de ocho años. Luego sucedieron año tras año frecuentes asesorías y colaboración por parte de los expertos del ITC (Villota, 1992). Desde la creación del centro Interamericano de Fotointerpretación – CIAF (hoy centro de investigación en percepción remota del Instituto Geográfico Agustín Codazzi) en 1967, la unidad de suelos ha venido desarrollando un sistema de clasificación del terreno basado en los conceptos de la Fisiografía, esbozados inicialmente por su cuerpo de profesores holandeses D. Goosen, E. Elbersen, E. Nieuwenhuis, y ajustados y complementados posteriormente por sus reemplazos colombianos P. Botero y H. Villota a diferente escala y para diferentes niveles de detalle de los levantamientos en los que aquél se utilice (Villota, 1992). Es un sistema de clasificación que posibilita estudiar cualquier zona rural desde el punto de vista biofísico, de manera jerárquica, de lo general a lo particular; la clasificación se utiliza en el análisis fisiográfico de imágenes de sensores remotos. De acuerdo con Villota (1992), este sistema tiene una estructura piramidal, en cuyo vértice se ubica la categoría denominada geoestructura (Figura 21), correspondiente a los territorios geológicos mayores en un continente: cordillera de plegamiento, escudo o cratón; megacuenca de sedimentación, entre otros. Las cinco categorías o niveles jerárquicos de esta metodología son:

1. Provincia fisiográfica
2. Unidad climática
3. Gran paisaje (unidad genética de relieve)
4. Paisaje
5. Subpaisaje

A continuación se define cada una de estas categorías (Figura 21), se exponen los criterios adoptados para su establecimiento. El megarelieve es considerado a nivel continental, caracterizado por una estructura geológica específica relacionada con la tectónica de placas: Orógeno, escudo, megacuenca. (Villota, 1992).



**Figura 21.** Sistema de clasificación fisiográfica y sus categorías (Villota, 1997)

- La primera división de la geoestructura, equivalente a una región morfológica, con características de macrorrelieve, macroclima y relación espacial definidas. Cordillera central, cordillera oriental, Amazonía, Orinoquía, Llanura del pacífico, depresión del Magdalena (Villota, 1992).
- La unidad climática, dentro de la provincia fisiográfica, cuya temperatura promedio anual a la humedad disponible son lo suficientemente homogéneas como para reflejarse en una pedogénesis específica y, por ende, en una cobertura vegetal o en un uso de la tierra igualmente definidos (Villota, 1992).

- Gran Paisaje equivale a una gran porción de tierra constituida, por asociación o complejo de paisajes con relaciones de parentesco de tipo geogenético, climático, litológico (grupos rocas) y topográfico general. Las formas generales del mesorelieve han sido determinadas por procesos geomórficos endógenos o exógenos definidos. Plegamiento, volcanismo, denudación, disolución, deposición fluvial, marina, lacustre, etc (Villota, 1992).
- El paisaje son porciones tridimensionales de la superficie terrestre resultantes de una geogénesis específica, que pueden describirse en términos de unas mismas características mesoclimáticas, morfológicas, de material litológico y/o edad, dentro de las cuales se espera alta homogeneidad pedológica y cobertura vegetal / uso de la tierra similares. Espinazo, estratovolcán, montaña ramificada, abanico, terraza, plano de marea, etc (Villota, 1992).
- Última categoría del sistema, correspondientes a una división del paisaje establecida según posición dentro del mismo (cima, ladera, falda, dique nat., orillares, basin) y, caracterizada por uno o más atributos morfométricos: forma y grado de la pendiente; tipo y grado de erosión; grado de disección; clase de condición de drenaje (Villota, 1992).

### 2.3.2 Paisaje Fisiográfico

Corresponde al cuarto nivel de generalización del sistema y es la unidad fisiográfica fundamental de los levantamientos semidetallados, tanto generales como exploratorios de suelos, por cuanto es a este nivel que se definen las clases de suelos (taxones), con características y propiedades comunes; de igual manera, en este nivel es donde se esperan comunidades vegetales relativamente homogéneas o usos similares de la tierra. Por consiguiente, esta clase de paisaje comprende porciones tridimensionales de la superficie terrestre, resultantes de una misma geogénesis y que pueden ser descritos en términos de iguales características climáticas, morfológicas, de material litológico y de edad, en las que puede esperarse una alta homogeneidad pedológica, así como una cobertura vegetal o un uso de la tierra similares (Villota, 1992).

### 2.3.3 Subpaisajes

Penúltima categoría del sistema, correspondiente a una división de los paisajes fisiográficos, hecha con propósitos prácticos relacionados con el uso y manejo potencial de los suelos. Parece correlacionable con la llamada forma del terreno de otros sistemas de clasificación del relieve como el de Alfred Zinck. Este nivel categórico se establece generalmente recurriendo a criterios morfométricos, como la posición dentro del paisaje (cima, ladera, rellano, ápice cuerpo, albardón, basín, orillares), calificada con uno o más atributos relacionados con los procesos morfogenéticos activos, a saber:

- La forma o grado de la pendiente
- Tipo y grado de la erosión acelerada- remoción en masa
- Clase de condición de drenaje (en llanuras)

En este sistema jerárquico de clasificación de las geoformas, la forma de terreno se considera como el concepto genérico del nivel inferior del sistema. Corresponde a la unidad geomorfológica elemental, la cual puede ser dividida sólo por medio de fases (Villota, 1992).

## 2.4 IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS ESPACIAL EN PATRONES VEGETALES

El análisis de distribuciones o patrones espaciales es una parte fundamental de una amplia variedad de disciplinas científicas, entre las que se incluyen la ecología, la geología, la geografía, la biología y la ingeniería. Siendo importante en todas ellas, el análisis de datos espacialmente explícitos, datos que contienen información sobre su localización en el espacio cobra una especial relevancia en ecología y ciencias afines. Dado que tanto los organismos como los factores abióticos que definen los ecosistemas presentan en la mayor parte de casos marcados patrones espaciales, el estudio de estos patrones es clave para poder entender dichas relaciones. Bajo el nombre genérico de análisis espacial se engloba a un conjunto de técnicas encaminadas a analizar cuantitativamente datos espacialmente explícitos (Maestre, 2004). La utilización de este tipo de análisis en ecología y ciencias afines tiene una gran tradición durante la primera mitad del siglo XX quedó claramente establecido que la distribución de los organismos en el espacio no es aleatoria, a la vez que comenzaron a desarrollarse métodos para examinar de forma cuantitativa los patrones espaciales de plantas (Watt, 1947) y animales (Bliss 1941). Desde entonces, el desarrollo de técnicas analíticas ha sido un área de investigación muy fructífera, especialmente a partir del momento en el que los ordenadores han permitido abordar tareas de cálculo que con anterioridad eran sencillamente imposibles. El patrón espacial se ha asocia de forma intuitiva a la distribución en el espacio de los organismos, aunque de una manera más formal puede definirse como la relación o dependencia espacial existente entre los valores que toma una variable en distintas localidades. Así pues, una determinada variable o proceso ecológico puede presentar, a grandes rasgos, un patrón espacial agregado, uniforme, en gradiente o aleatorio. Respecto al concepto de heterogeneidad. Siguiendo a Adler et al. (2001), cuando se habla de la heterogeneidad desde un punto de vista genérico se la considera como sinónimo de variabilidad, entendida ésta como los cambios en los valores de un determinado descriptor en el espacio o en el tiempo. Cuando esta variabilidad se encuentra estructurada espacialmente, se utiliza heterogeneidad como sinónimo de patrón espacial. Así pues, y en función del contexto que se considere, heterogeneidad se emplea como sinónimo de variabilidad o de patrón espacial (Maestre, 2004).

### 2.4.1 Geomorfometria

Es la ciencia del análisis cuantitativo de la superficie de la tierra (Pike, 1995, 2000; Rasemann et al., 2004). Es un enfoque moderno analítico-cartográfico para representar la topografía de la superficie de la tierra descubierta, a través de la manipulación computarizada de la altura o elevación (Tobler, 1976, 2000). La Geomorfometría es un campo interdisciplinario que evolucionó a partir de las Matemáticas, las Ciencias de la Tierra, y recientemente de las ciencias de la computación. Aunque la Geomorfometría ha sido referida como una actividad dentro campos más establecidos, desde la Geografía y Geomorfología hasta la Ciencia del Suelo y la Ingeniería Militar; ya no es simplemente una colección de técnicas numéricas sino una disciplina en su propio derecho (Pike, 1995), (Hengl et al, 2009). Es bueno tener en mente los dos modos del análisis geomorfométrico que se sobreponen y que fueron descritos por Evans (1972): específico, que se encarga de elementos de superficies discretas (por ej. geoformas-landforms); y general tratando las superficies terrestres continuas. La morfometría de las geoformas per se, con o sin el uso de datos digitales, es más correctamente considerada parte

de la geomorfología cuantitativa (Thorn, 1988; Sheidegger, 1991; Leopold et al., 1995; Rhoads and Thorn, 1996; Hengl et al, 2009). La representación numérica de la superficie de la tierra es conocida ampliamente como modelamiento de terreno (Li et al., 2005), análisis digital del terreno (Wilson and Gallant, 2000), o la ciencia de la topografía (Mark, 2004). Los descriptores cuantitativos o medidas de la superficie de la tierra, han sido referidos como atributos o propiedades topográficas (Wilson, 2000), parámetros de las geo-formas (Speight, 1968), variables morfométricas (Shary et al., 2002), información del terreno, atributos del terreno (Pennock, 2003), y atributos Geomorfométricos (Schmidt, 1999). La Geomorfometría es la ciencia de la cuantificación topográfica; su concentración operacional es la extracción de parámetros y objetos de la superficie de la tierra a partir de los Modelos Digitales de Elevación (Digital Elevation Models-DEMs). El análisis Geomorfométrico del MED estudia el relieve y la orografía de la superficie por éste definida, caracterizándolo a través de parámetros adicionales. Recurriendo una vez más a los conceptos del álgebra de mapas. Estos parámetros se basan en su gran mayoría en un análisis focal. Este análisis emplea la caracterización matemática, así como, formulaciones estadísticas sencillas (Hengl et al., 2009). Para minimizar confusión, los autores del libro Geomorphometry (Hengl et al., 2009) acordaron usar de forma consistente Geomorfometría para denotar la disciplina científica y superficie de la tierra (land surface) para indicar el objeto principal de estudio. La representación digital de la superficie de la tierra entonces es referida como modelo digital de la superficie de la tierra (digital land surface model, DLSM), un tipo específico de modelo digital de la superficie (digital surface model, DSM), lo que es más o menos equivalente al término ampliamente aceptado modelo digital de elevación (digital elevation model, MED) (Hengl et al., 2009). En Geomorfometría, el MED se refiere a un conjunto de puntos en grilla en el espacio Cartesiano, cuyos atributos son los valores de la elevación, misma que trata de aproximarse a la superficie de la tierra. Por lo que de acuerdo a Geomorfometría, las curvas de nivel u otro tipo de datos sobre elevación, como el arreglo triangular, no son MEDs. El término MED implica que la elevación esté disponible en cada lugar de la reja o grilla, a una resolución dada (Hengl et al., 2009). Parámetros y objetos, son dos entidades derivadas de los MED que son fundamentales para la Geomorfometría moderna (Mark, 2004). Un parámetro de la superficie de la tierra (land surface parameter), es una medida descriptiva de la forma de la superficie (ej. pendiente, aspecto, índice de humedad); es una serie de campos con valores continuos, comúnmente imágenes raster o mapas para la misma área de referencia como su fuente, el MED (Hengl et al., 2009). La operación fundamental en Geomorfometría es la extracción de parámetros y objetos a partir del MED. Estos modelos de la superficie de la tierra, son los insumos principales para el análisis morfométrico (Figura 22). En términos de SIG, el MED es un simple mapa raster o vector que muestra la altura de la superficie terrestre por encima del nivel del mar, o cualquier otro horizonte de referencia (Hengl et al, 2009).



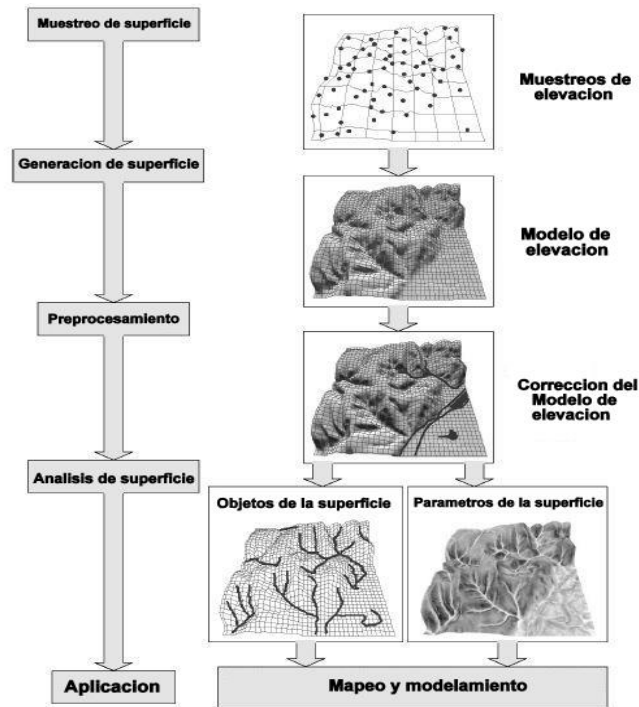
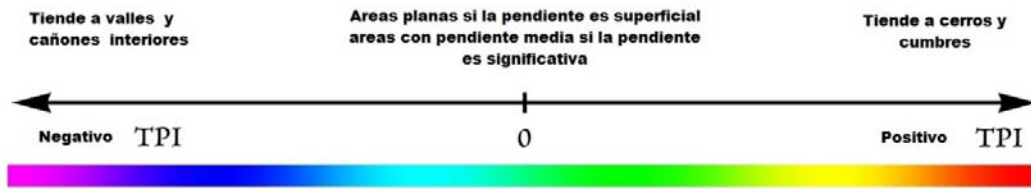


Figura 22. El enfoque operacional de Geomorfometría (Hengl et al., 2009).

## 2.4.2 Índice de posición topográfica

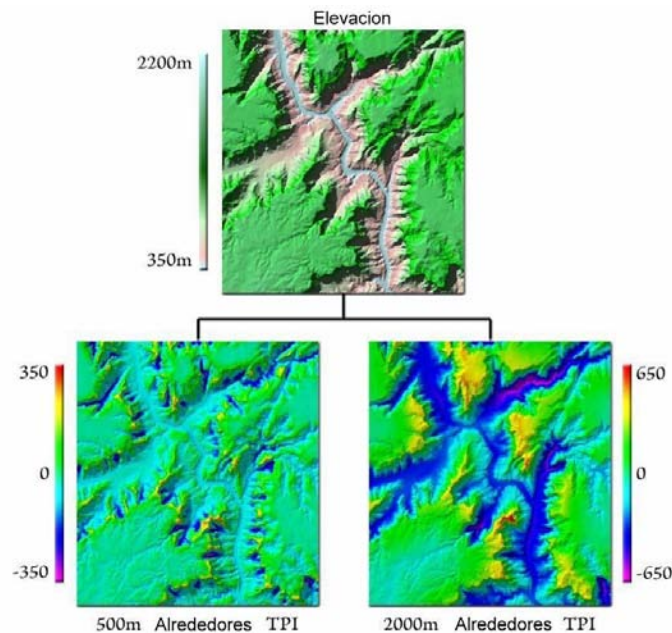
Andrew Weiss presentó un útil y muy interesante póster en la Conferencia Internacional de Usuarios ESRI del 2001, describiendo el concepto de Topographic Position Index (TPI) o Índice de posición topográfica y cómo podría calcularse (Weiss 2001; Guisan et al., 1999 y Jones et al., 2000). El uso de este TPI en distintas escalas, más la pendiente, los usuarios pueden clasificar el paisaje en ambos sentidos pendiente y posición (es decir ridge top: cordillera, cerro y valley bottom: valle inferior o fondo de valle, mid-pendiente: pendiente media, etc.) y categorías fisiográficas (es decir escarpados, estrechos, cañones, valles, llanuras, laderas abiertas, mesetas, etc). Los algoritmos son inteligentes y bastante simples. El TPI es la base de la clasificación del sistema y es simplemente la diferencia entre una celda de valor de elevación mayor y la elevación promedio del barrio alrededor de esa celda. Los valores positivos significan que la celda es superior a su entorno, mientras los valores negativos significan que es menor (Jenness, 2006). El grado en que es mayor o menor, más la pendiente de la celda, puede ser utilizada para clasificar la celda dentro de la posición de la pendiente (Figura 23). Si es significativamente más alto que los alrededores vecinos, entonces es probable que esté en o cerca de la cima de una colina o cerro. Considerablemente los valores bajos sugieren que la celda está en o cerca de la parte inferior de un valle. Valores TPI cerca de cero pueden significar un

área plana o una pendiente media del talud, así que la celda pendiente puede ser utilizada para distinguir las dos (Jenness, 2006).



**Figura 23.** Grado de variación en la posición de la pendiente (Jenness, 2006).

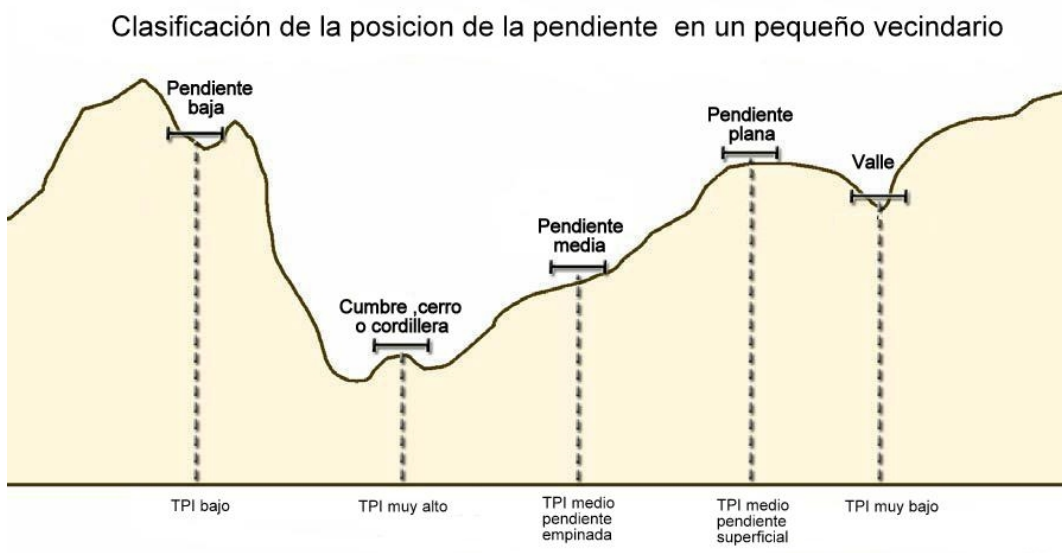
En la ilustración de abajo (Figura 24) los valores TPI son calculados utilizando dos diferentes vecinos. El ejemplo de la izquierda utiliza unos vecinos circulares con 500 metros de radio, midiendo los valores TPI para cada celda, refleja la diferencia entre la elevación de dicha celda, y el promedio de elevación de todas las celdas dentro de 500 metros de dicha celda. Los vecinos han hecho un buen trabajo de identificación de valores extremos en cañones y drenajes. El ejemplo de la derecha utiliza un vecindario circular con 2000 metros de radio e hizo un mejor trabajo destacando el relieve general del sistema de cañones (Jenness, 2006).



**Figura 24.** Valores TPI calculados utilizando dos diferentes vecinos (Jenness, 2006).

Los valores TPI pueden ser clasificados fácilmente en clases de pendiente, sobre la base de cuán extremas son y por la pendiente en cada punto. Hay un par de estrategias que se pueden utilizar para hacerlo. La manera más fácil y sencilla para fijar valores umbral para los temas de grillas TPI. Valores TPI encima de un cierto umbral podrían clasificarse como cerros o colinas, mientras valores TPI por debajo de un umbral podrían clasificarse como fondo de los valles o depresiones. Valores TPI cerca de 0 podrían clasificarse como llanuras (si la pendiente es cerca de 0) o como zonas de pendiente media. Un método algo más sofisticado, ilustrado por Weiss en su póster, es definir el umbral los valores de TPI en términos de desviaciones estándar de la elevación, por lo que tiene en cuenta la variabilidad de los valores de elevación dentro de ese vecindario. Esto significa que las celdas de la red con valor de TPI idénticos, pueden clasificarse

de manera diferente en diferentes áreas, dependiendo de la variabilidad en los respectivos vecinos. Este método puede o no ser útil en el análisis. Se puede usar este método si se considera que las celdas con alta variabilidad de elevación en el vecindario, deberían tener que responder a un mayor umbral TPI, con el fin de ser clasificados en alguna categoría. Al igual que con los valores de TPI, en general, el tamaño del vecindario también es un componente crítico del proceso de clasificación de la pendiente (Figura 25). Vecindarios pequeños captarán características pequeñas y locales como, colinas y valles; mientras que los vecindarios grandes pueden captar mayor escala de características (Jenness, 2006).



**Figura 25.** Clasificación de la posición de la pendiente (Jenness, 2006).

Los valores TPI cerca de 0, significan sólo que la elevación se encuentra cerca de la elevación media de la celda del vecindario, y esto podría ocurrir si la celda se encuentra en un área plana o en alguna parte de pendiente media. Una forma fácil de distinguir entre estas 2 posibilidades es comprobar la pendiente en ese punto. Si la pendiente es cerca de 0, entonces el punto es probablemente una superficie plana. Un alto valor de pendiente, implica que el punto tiene una pendiente media en algún lugar (Jenness, 2006).

### 2.4.3 DSM y DTM

Los modelos digitales de superficie (DSM - Digital Surface Model), son la representación fiel de todas las variaciones de elevación de los objetos y superficies presentes en el momento de la toma de los datos; ya sea estos por instrumentos fotogramétricos, Lidar o Radar. Estos pueden tener una estructura de representación de datos regular o irregular. La diferencia principal de los modelos digitales del terreno (DTM – Digital Terrain Model) con los modelos DSM es que estos representan solo los valores de elevación de los puntos más bajos de una superficie (Terreno) a diferencia del otro que representan todas las superficies. Los DTM pueden ser un producto originado de algún proceso del DSM. El modelo de elevación digital (DEM - Digital Elevation Model) es uno de los términos comunes que más se ha prestado para confusión debido a que el concepto del DSM no se ha entendido o se desconoce por parte de muchos profesionales. Realmente el término DEM corresponde a un atributo de elevación en un modelo

digital con una proyección específica y una estructura de representación de datos regular; ya sea este a partir de DSM o DTM por que representa la elevación y no discrepa entre el concepto de su creación para diferenciarlo (Figura 26).

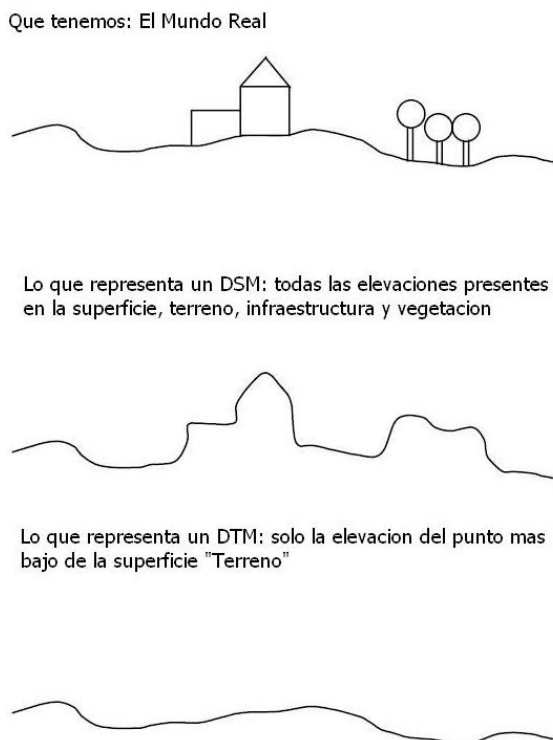


Figura 26. Diferencias entre un DSM y un DTM. (Modificado de Linder, 2009).

## 2.4.4 Escala de Beaufort

La escala de Beaufort es una medida empírica para poder calcular la fuerza y la intensidad con la que sopla el viento. Fue desarrollada por Sir Francis Beaufort (oficial naval e hidrógrafo), alrededor de 1805, es muy utilizada en el ámbito marino y meteorológico para denotar la fuerza con la que sopla el viento en determinado lugar, su nombre completo es escala de Beaufort de la fuerza de los vientos (Tabla 7).

Tabla 7. Escala de Beaufort de la fuerza de los vientos.

Escala de velocidades de viento			
Velocidades de viento a 10 m de altura		Escala Beaufort	Viento
m/s	nudos		
0,0-0,4	0,0-0,9	0	Calma
0,4-1,8	0,9-3,5	1	
1,8-3,6	3,5-7,0	2	Ligero
3,6-5,8	7-11	3	
5,8-8,5	11-17	4	Moderado

8,5-11	17-22	5	Fresco
11-14	22-28	6	Fuerte
14-17	28-34	7	Temporal
17-21	34-41	8	
21-25	41-48	9	Fuerte temporal
25-29	48-56	10	
29-34	56-65	11	Huracán
>34	>65	12	

## 2.4.5 Rugosidad del terreno

A una gran altura de la superficie del suelo, alrededor de un kilómetro, la superficie terrestre apenas ejerce influencia alguna sobre el viento. Sin embargo, en las capas más bajas de la atmósfera, las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento. Los bosques y las grandes ciudades ralentizan mucho el viento, mientras que las pistas de hormigón de los aeropuertos sólo lo ralentizan ligeramente. Las superficies de agua son incluso más lisas que las pistas de hormigón, y tendrán por tanto menos influencia sobre el viento, mientras que la hierba alta y los arbustos ralentizan el viento de forma considerable. La rugosidad de una superficie se determina por el tamaño y distribución de los elementos de rugosidad que contiene. Se evalúa mediante el parámetro denominado longitud de rugosidad  $z_0$ , que nos da la altura a la cual la velocidad media es cero cuando el viento tiene una variación logarítmica con la altura:

$$Z_0 = 0.5 \cdot S \cdot h / Ah$$

**Figura 27.** Formula de rugosidad (Lettau, 1969).

Con  $h$ ,  $S$ : altura y sección cara al viento de los elementos de rugosidad.  $Ah$ : área horizontal media correspondiente a cada obstáculo (Mur, 2010). Los resultados de la fórmula se interpretan con la tabla de rugosidades (Tabla 8) y sirven para analizar qué tanta resistencia tiene un terreno dado al arrastre por el viento.

**Tabla 8.** Clases de rugosidad (Wiernga, 1993).

Tabla de clases y de longitudes de rugosidad			
Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad m	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

# PARTE III

---



*Faro de Punta Gallinas, extremo más septentrional de la placa continental de Suramérica.*

## CAPÍTULO 3 (MARCO METODOLÓGICO)

---

### III. MARCO METODOLOGICO

La presente investigación se basó en un enfoque biofísico (Hipotético – Deductivo) que integra tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota (PR), con el propósito de entender el comportamiento de los parches de vegetación Leopardo a través de construcción de modelos geoespaciales, información secundaria y levantamiento de información primaria (Biofísica y medio social) que permitieron conocer el contexto biogeográfico del patrón en la península de la Guajira. Se utilizó información recabada en campo así como, imágenes de satélite de alta resolución históricas (Corona KH-4A) y actuales (QuickBird, EROS-B), además de modelos de elevación digitales para producir mapas de distribución de la vegetación con el objetivo de estudiar y caracterizar el área con un proceso cartográfico de alta resolución. Se realizó un modelo mundial de la distribución potencial de la vegetación Leopardo utilizando un modelo de máxima entropía junto con predictores ambientales y datos de presencia tomados en campo y referencias bibliográficas. La metodología general del trabajo se presenta en el siguiente diagrama (Figura 28)

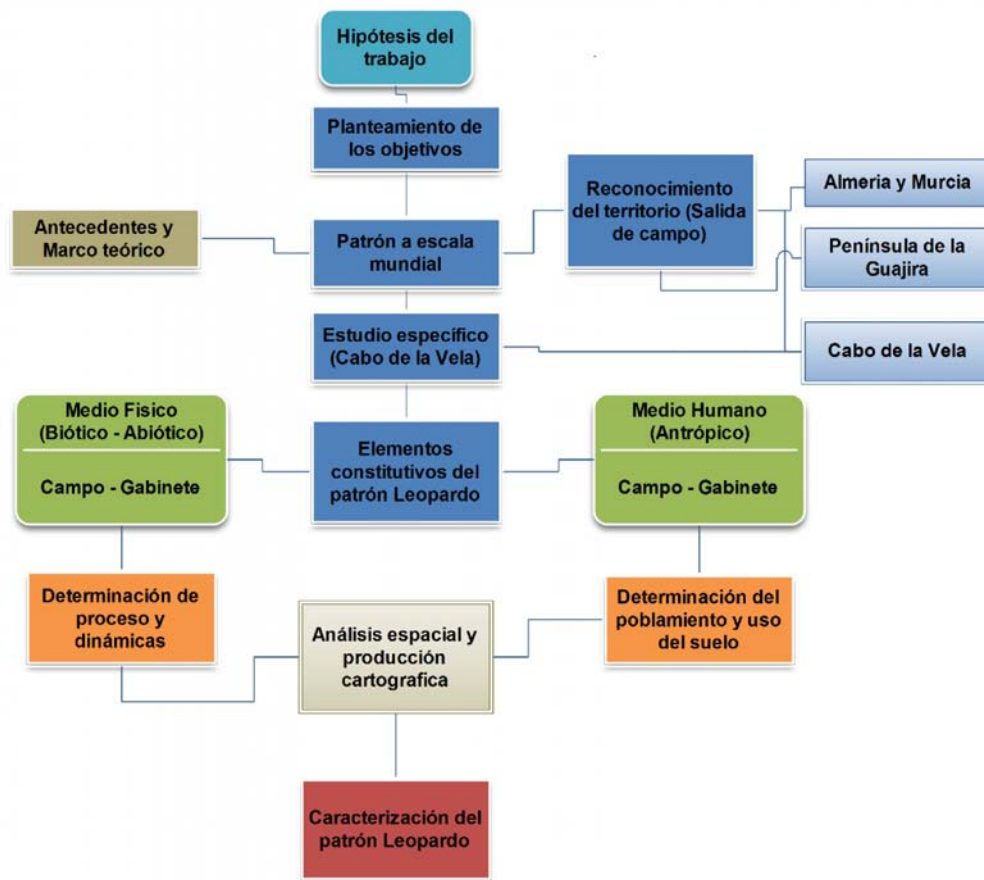
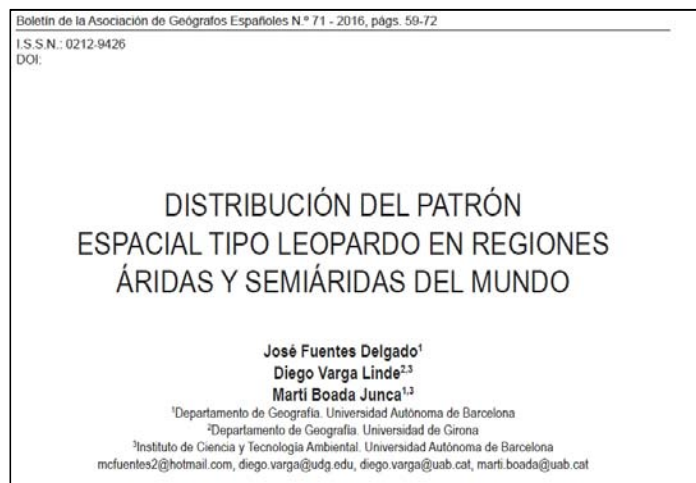


Figura 28. Metodología general del trabajo.



### 3.1 PATRÓN LEOPARDO A ESCALA GLOBAL

Para tener una visión más amplia de cómo se distribuía el patrón Leopardo en otros lugares se desarrolló un modelo mundial donde se analizó a nivel global la posible presencia y más amplia distribución del patrón. Este fue presentado en un artículo científico en el boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles número 71 de 2016 (Figura 29). A partir de Información bibliográfica alrededor del mundo y de datos de campo obtenido en Colombia y España se caracterizan los factores utilizando predictores ambientales globales en conjunto con un modelo de máxima entropía. En el modelo de distribución, las condiciones ambientales indican que la aridez y la variabilidad topográfica, son factores de peso que tiene un gran valor en las estadísticas que definen los patrones, revelando una extensa distribución de ambientes distintivos nuevos al alrededor del mundo, así como, el fenómeno asociado de convergencia evolutiva y de algunos géneros vegetales predominantes en varios continentes a los que se puede asociar este patrón.



**Figura 29.** Artículo presentado en el boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles (Anexos).

Cita bibliográfica:

**Distribución del Patrón espacial tipo Leopardo en regiones áridas y semiáridas del mundo**  
*José Fuentes Delgado, Diego Varga Linde, Martí Boada Junca. : Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, ISSN 0212-9426, N°. 71, 2016, págs. 59-72*

Disponible online:

<http://www.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/viewFile/2274/2158>

Resumen extendido en ingles:

<http://www.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/viewFile/2274/2157>

#### 3.1.1 Muestra de patrones (Presencia)

Los puntos de presencia de patrones Leopardo alrededor del mundo fueron recopilados a partir de información bibliográfica (Tongway 1990; Slatyer 1959; Aguiar 1999; Bisigato, 2009; Juergens, 2012; Yetemen, 2010; Bestelmeye, 2006; Borgogno, 2009; Wickens 1971; Lefever,

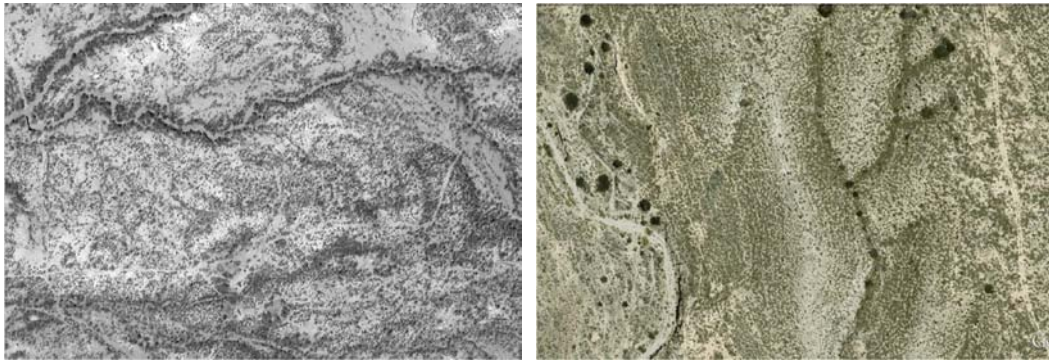
2009; Meron, 2004) (Tabla 9) y de datos recolectados en campo (Tabla 10) en áreas no antes reportadas como es el caso, en la península de la Guajira en Colombia y las áreas de Almería y Murcia en España (Figura, 30). Los puntos de referencia de la información bibliografía fueron verificados utilizando imágenes de alta resolución disponibles en los servicios en línea BingMaps y Google Earth, estos sistemas incluyen cientos de terabytes en imágenes aéreas y de satélite. En muchas áreas, la resolución máxima es de menos de un metro. En otros lugares, especialmente en las zonas más remotas del mundo, la resolución es de una magnitud menor a 5 metros. Luego de verificar todas las localidades se determinaron 150 puntos de presencia del patrón Leopardo alrededor del mundo (Figura 31).

**Tabla 9.** Datos de presencia del patrón Leopardo tomados de referencias bibliográficas.

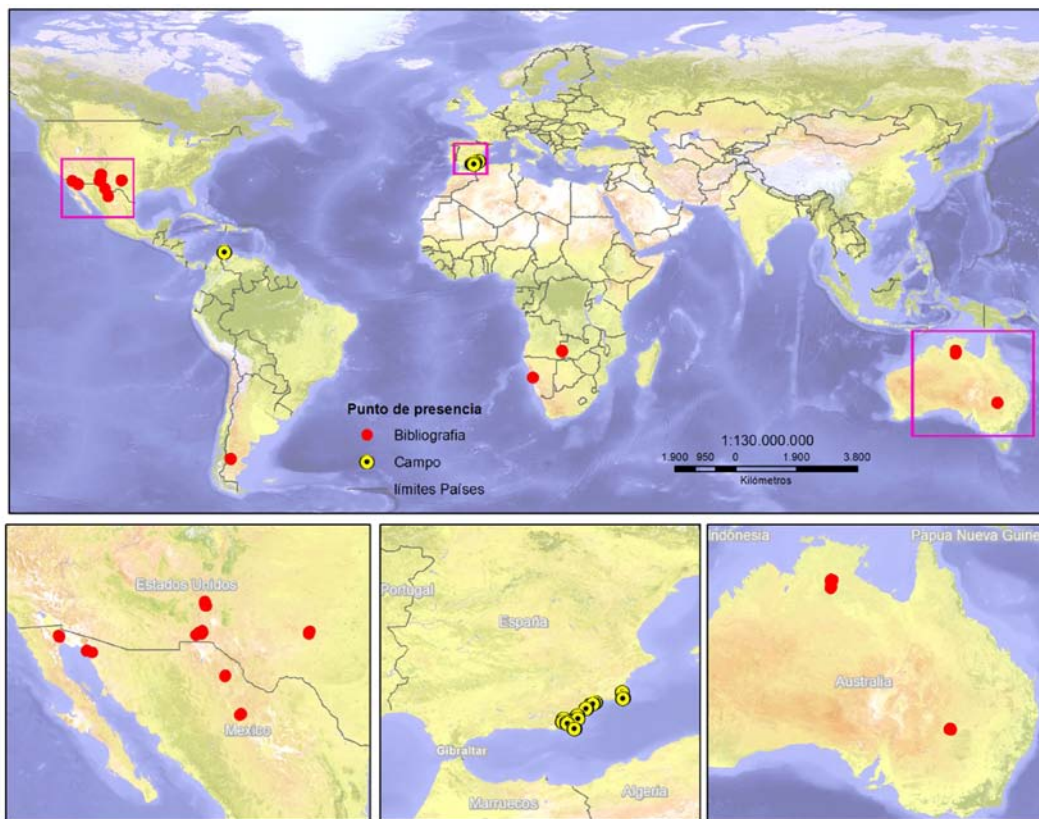
Lugar	Continente	Distancia	Especie	Referencia	Precipitación
Sturk national Park	Australia	10-50m	<i>Acacia anuera</i> <i>Eragrostis eriopoda savanna</i> <i>Monachather paradoxa savanna</i>	Tongway 1990	308 mm
Alice Springs	Australia	20-40m	<i>Acacia anuera</i> <i>Eragrostis eriopoda savanna</i>	Slatyer 1959	250 mm
Río Mayo - Argentina	América	2 m	<i>Stipa speciosa</i> <i>Swietenia humilis</i> <i>Poa ligularis</i> <i>Mulinum spinosum</i> <i>Adesmia campestris</i> <i>Senecio filaginoides</i>	Aguiar 1999	160 mm
Desierto del Monte, Argentina	América	2- 3m	<i>Prosopis flexuosa</i> <i>Larrea divaricata</i> <i>Aristida adscensionis</i>	Bisigato, 2009	30 - 350 mm
Sevilleta Wildlife National Refuge New Mexico	América	20-40m	<i>Juniperus monosperma</i> <i>Bouteloua eriopoda</i> <i>Larrea tridentata</i> <i>Erioneuron pulchellum</i>	Yetemen, 2010	250 mm
Chihuahua Las Cruces, NM	América	1-2m	<i>Pleuraphis mutica</i> <i>Prosopis glandulosa Torr</i> <i>Flourensia cernua</i> <i>Lycium berlandieri</i> <i>Larrea tridentata</i>	Bestelmeye, 2006	220mm
Zambia	África	15-30m	No hay datos	Borgogno, 2009	230mm
Kordofán y Darfur - Sudan	África	30-50m	<i>Acacia mellifera</i> <i>Terminalia brownii</i>	Wickens 1971	350mm
South-West Niger	Africa	1.75- 50m	<i>Combretum micranthum</i>	Lefever, 2009	200mm
Namibia	África	3-5m	<i>Stipagrostis sabulicolae</i> <i>Cladoraphis spinosus</i>	Juergens, 2012	285 mm
Negev - Israel	Asia	1-2 m	<i>Paspalum vaginatum</i> <i>Poa bulbosa</i>	Meron, 2004	200mm

**Tabla 10.** Datos de presencia del patrón leopardo tomados de referencias bibliográficas.

Lugar	Continente	Distancia	Especie	Precipitación
La Guajira, Colombia	América	10 -50m	<i>Castela erecta</i> <i>Heterostachys ritteriana</i> <i>Prosopis juliflora</i>	152-308 mm
Almería y Murcia, España	Europa	2- 5m	<i>Acacia anuera</i> <i>Eragrostis eriopoda savanna</i> <i>Monachather paradoxa savanna</i> <i>Arthrocnemum fruticosum</i> <i>Launaea lanifera</i> <i>Lycium intricatum</i> <i>Salsola genistoides</i> <i>Salsola oppositifolia</i>	199-289 mm



**Figura 30.** Patrones espaciales tipo Leopardo (izq) la Guajira, Colombia 2013 (12° 9'36.17"n - 72° 7'44.64"o) (der) Almería, España 2010 (36°52'52.26"n - 2°20'39.02"o). Fuente: EROS-B Imagesat internacional, Ortofoto PNOA, IGN



**Figura 31.** Puntos de presencia de patrones leopardo alrededor del mundo, tomados desde referencias bibliográficas e información de campo.

### 3.1.2 Variables ambientales y datos climáticos

Las variables ambientales refinaron la aplicación de la técnica de modelación en conjunto con un modelo de máxima entropía, se trabajó con un set de variables bioclimáticas predefinidas para caracterizar el espacio ambiental donde se distribuyen las variables climáticas, topográficas y edafológicas. Para evitar que el modelo de distribución tuviera un exceso de información y minimizar el número de variables ambientales correlacionadas, elegimos un subconjunto donde todos los coeficientes de correlación fueron menos de 0,80. La resolución de los datos fue de

0,5 ° para todas las capas de análisis disponibles se consideraron 6 capas temáticas relevantes como predictores del modelo. La temperatura y precipitación anual, fueron obtenidas de WorldClim (<http://WorldClim.org>) dentro de su base de datos climática global para fines de modelamiento ambiental (1950-2000) (Hijmans, 2005). El índice de aridez global y la radiación solar extraterrestre están basados en el modelado y análisis por Antonio Trabucco, (se ofrecen en línea por el CGIAR-CSI con el apoyo del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT son a la vez el modelo, utilizando los datos disponibles de WorldClim). La elevación fue basada en los datos Shuttle Radar Topography Mission (por sus siglas en inglés SRTM) completos para el mundo en la versión 4, disponible en el CGIAR-CSI SRTM de 90m base de datos derivada (Jarvis, 2008). Finalmente se utilizó base de datos armonizada mundial de los suelos Harmonized World Soil Database (HWSD) (Nachtergaele, 2012) todas las capas fueron cortadas en la misma referencia espacial y tamaño de pixel para poder ser procesadas en formato raster.

### **3.1.3 Modelo de distribución potencial**

En los últimos años ha tomado fuerza el uso de técnicas basadas en algoritmos específicos como máxima entropía y algoritmos genéticos (Phillips, 2006; Stockwell, 1992 y 1999). Han significado un aumento exponencial en el número de publicaciones y estudios asociados a la modelación de la distribución geográfica de las especies y ecosistemas, por la facilidad de su aplicación y la rapidez con que se pueden obtener resultados (Pliscoff, 2011). Para generar el modelo empírico potencial se utilizó Maxent (Version 3.3.3) un algoritmo de máxima entropía (Phillips, 2006; Elith, 2011), este muestra la probabilidad de que una celda dada, se tenga una muestra de presencia, para ello utiliza un índice de similitud dentro de unas variables ambientales (predictores) respecto a las celdas donde se ha observado a la especie. Los valores de dicho índice tendrán valores de probabilidad más altos en los espacios semejantes a los lugares donde se ubicaron las muestras conocidas. El modelo inicial permitió generar un mapa de distribución potencial de presencia del patrón Leopardo a nivel global basado en las características de los lugares reportados en campo y en la bibliografía.

Los Modelos de distribución de especies (por sus siglas en inglés SDM) estiman la relación entre registros de especies en los sitios y el medio ambiente y / o características espaciales de esos sitios (Franklin, 2009). Maxent es un método de aprendizaje computacional de propósito general simple, con una formulación matemática precisa y tiene una serie de aspectos que lo hacen muy adecuado para el modelado de la distribución de especies (Phillips et al, 2006). Es un método no paramétrico, el cual genera una distribución de probabilidad sobre los píxeles de la grilla, empieza por una distribución uniforme y de forma iterativa mejora el ajuste de la distribución a los datos de muestreo; para ello tiene en cuenta las curvas de respuesta. Los puntos de muestreo para realizar el test del modelo son una muestra tomada al azar de las localidades de presencia. Maxent utiliza el mismo conjunto de datos tomados al azar en cada vuelta del modelo. Al final del proceso, el valor de la ganancia indica cómo está de ajustado el modelo a las muestras de presencia (Phillips, 2005). Los valores de salida de las distribuciones predichas son acumulativos, con el valor de salida de una celda de la cuadrícula correspondiente a la suma de las probabilidades de todas las cuadrículas de menor o igual valor a la probabilidad de la celda considerada. En otras palabras, el conjunto de valores más altos que 5% incorpora el 95% de la distribución de probabilidad alrededor de la óptima ecológica (Deblauwe, 2008).

### **3.1.4 Evaluación del rendimiento general del modelo**

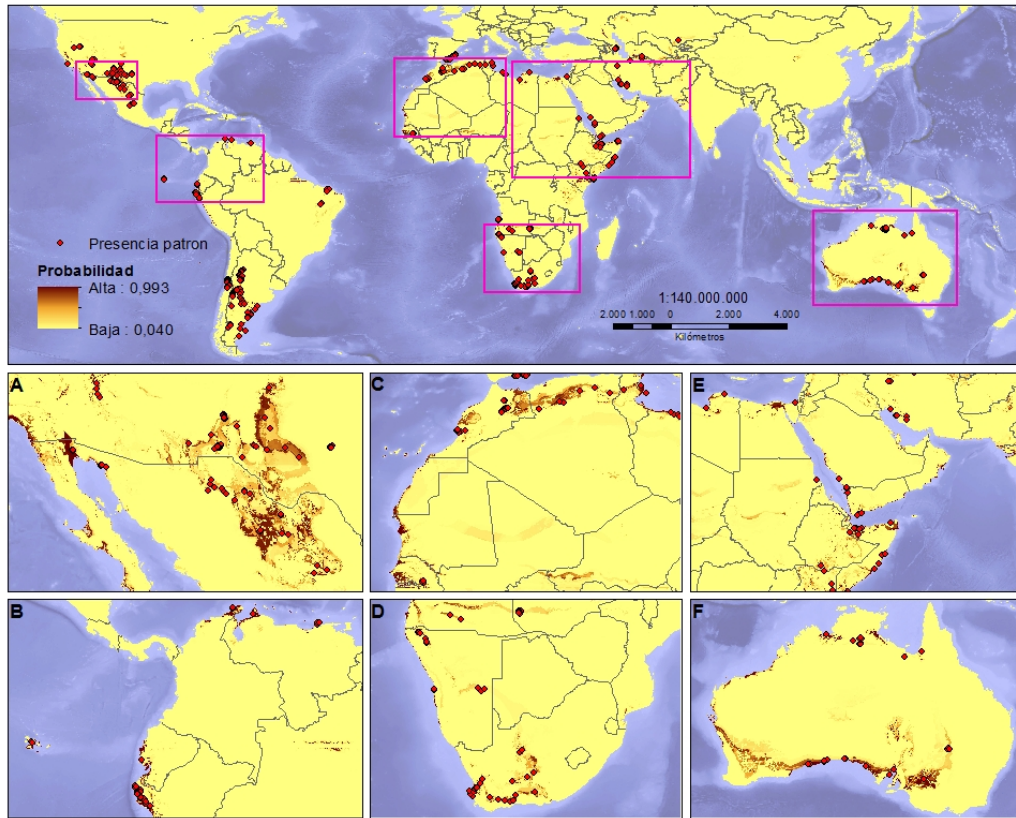
Se evaluó el rendimiento general del modelo mediante el cálculo del área bajo la curva (AUC), para lo cual se utilizó el 25% de los puntos de muestra para ser excluidos de los registros y no usarlos en la prueba. La curva ROC es un indicador de la predicción de una acertada

presencia o ausencia en la distribución de los datos dentro de los umbrales. Se analizan los valores de las medidas de umbrales independientes, uno para entrenar y el otro para testar el modelo, lo normal es que la curva AUC de entrenamiento aparezca por encima de la curva AUC de test. La curva de entrenamiento representa el ajuste del modelo a los datos de muestreo. La curva test indica el grado de ajuste del modelo a los datos de test, y supone el test real del poder predictivo del modelo (Phillips, 2005). Los resultados sobre la predicción del AUC pueden variar de 0 a 1, lo cual indica que la predicción es aleatoria cuando es próximo a 0.5 y una muy buena predicción cuando el umbral se acerca a 1. Dentro del estudio se tuvo en cuenta las imitaciones conocidas del AUC, las cuales se refieren a la variación del valor de puntuación más alto, cuando la zona de muestreo es inferior en extensión a la distribución de las muestras. Los datos de distribución de especies se refiere a un ámbito geográfico concreto y el aumento de la extensión geográfica presente fuera del dominio del medio ambiente implica la obtención de las puntuaciones más altas de las AUC (Lobo, 2008). Teniendo en cuenta las limitaciones del AUC, el uso de este puede proporcionar información valiosa al utilizar en lugares relativamente homogéneos y con muestras definidas e iguales escalas como es nuestro caso.

### **3.1.5 Distribución potencial del patrón Leopardo**

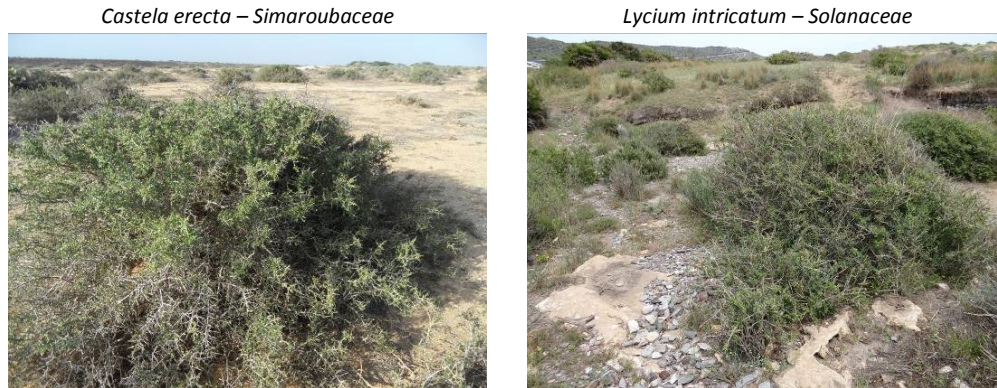
El modelo mostró la distribución probable de las áreas en el globo donde se puede evidenciar patrones regulares tipo Leopardo, dentro de las contribuciones relativas de las variables ambientales en el modelo de Maxent, el predictor que tuvo una mayor aporte porcentual fue el índice de aridez global, el que tuvo un 40.2, seguido del predictor de elevación global STRM con un 18.3 éstas dos variables representan más del 50 % de la contribución total a los valores más significativos del índice. La precipitación 14.5, la temperatura 12.4 y en menor medida la radiación solar con 9.8 y los suelos con 4.9. Para el modelo ejecutado las puntuaciones de las AUC fueron estadísticamente muy significativa 0.993, dándole un gran valor predictivo a el modelo de distribución resultante, al superar el límite medio de 0.5 con una mayor aproximación al valor máximo 1, lo que confirmó la pertinencia de ésta predicción al revelar zonas nuevas del mundo donde no se han tenido reportes de presencia del patrón Leopardo anteriormente (Figura 32).

El modelo reveló la extensa distribución de ambientes distintivos para la presencia del patrón Leopardo, arrojó zonas no identificadas anteriormente o con muy pocas referencias. Estas áreas incluyen el desierto de Chihuahua y Sonora entre Estados Unidos y México (Figuras 32a), el sur de Ecuador e Islas Galápagos y el norte del Perú en el área de Piura (Figura 32b), una franja costera desde Libia hasta Gambia en África Occidental alrededor del desierto del Sahara (Figura 32c), Sudáfrica y desde Angola hasta Namibia por la franja costera alrededor del desierto del Kalahari (Figuras 32d), áreas alrededor de Somalia, Kenia, Yemen y Oman (Figura 32e) y finalmente áreas al borde del desierto Australiano (Figura 32f). Otras características ambientales importantes que se definieron en las áreas aisladas fueron: la precipitación anual, que se encuentra el rango de 100 mm a 300 mm, el rango temperatura que es característicamente muy importante en ambientes áridos y en donde los patrones ocurren dentro de la gama de 10° a 26 ° C, la elevación que muestra un rango entre 0 a los 1700 metros, la radiación solar que se encuentra en los rango de 10 a 15mm/mes y por último el índice de aridez que se encuentra en el rango de 0 a 0.2 dentro de la característica de árido en la clasificación de las zonas áridas de la UNESCO (De Pauw, 2000). Referente a las propiedades del suelo predominan los calcisoles, suelos con orígenes calcáreos muy típicos de ambientes áridos, donde el material original lo constituyen depósitos aluviales, coluviales o eólicos de materiales alterados.



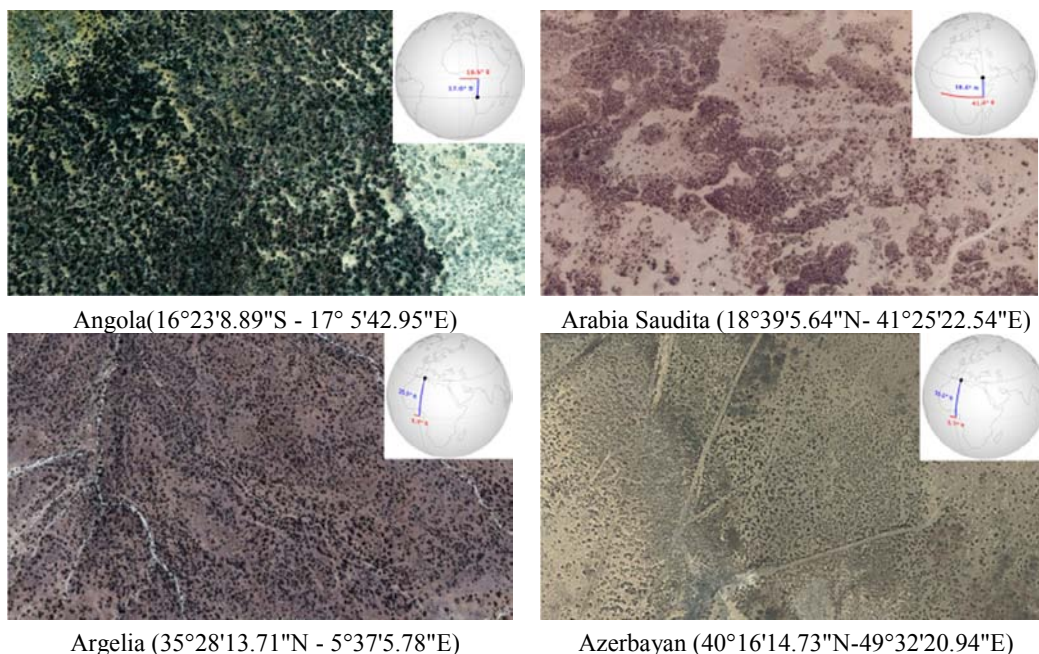
**Figura 32.** Modelo de distribución potencial del patrón espacial tipo Leopardo.

Se identificaron lugares con ambientes distintivos, con una clara semejanza entre sí, una de estas características se comprobó en los trabajos de campo llevados a cabo en España y Colombia. Donde se encontró evidencia del fenómeno llamado convergencia evolutiva (Arendt, 2008), en estos lugares los patrones Leopardo se conforman principalmente por dos especies *Castela erecta* y *Lycium intricatum* (Figura 33), estas plantas pertenecientes a familias distintas *Simaroubaceae* y *Solanaceae*; son muy parecidas en su aspecto feno-morfológico y estructural, pero sin una conexión biológica y evolutiva directa, conformando patrones afines de desarrollo en el ambiente árido donde se desenvuelven, siendo probable que sean modificadas de manera similar y sujetas a presiones de selección similares.



**Figura 33.** Especies identificadas en campo (izq) Guajira, Colombia ( $12^{\circ}24'31.34''n - 71^{\circ}43'59.63''o$ ) (der) Murcia, España ( $37^{\circ}36'18.62''n - 0^{\circ}43'43.55''o$ )

Para comprobar la estimación de la exactitud de la clasificación, se tomaron 100 puntos de muestra seleccionados sobre el modelo de distribución potencial, se utilizó la matriz de confusión, para ello se seleccionaron los puntos sobre los valores superiores al 0.90. El objetivo es evidenciar la proporción de muestras correctamente clasificadas, comprobando si los patrones se encuentran presentes a través de las imágenes de satélite disponibles en línea utilizando los servicios cartográficos de BingMaps y Google Earth. Generalmente es admisible para una muestra la relación entre tamaño del universo y un error estándar relativo del 10 por ciento. Cuando la matriz de confusión presenta muchas categorías se requiere de un gran número de muestras para evaluar su exactitud, pero en este caso solo se utiliza una única clase. El resultado fue de una precisión con una fiabilidad global del 91 % esto se comprobó con las muestras cotejadas en distintos lugares del mundo donde se verificó la existencia del patrón Leopardo, en muchos de los lugares donde no se tenía reportes anteriores o no existían referencias directas debido a la amplia distribución global (Figura 34).



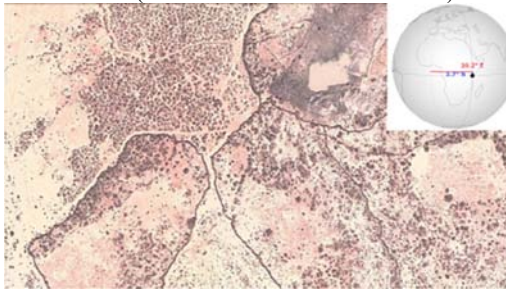
Parte III. Marco metodológico



Brasil ( $4^{\circ}53'54.96''\text{S}$  -  $37^{\circ}13'50.61''\text{O}$ )



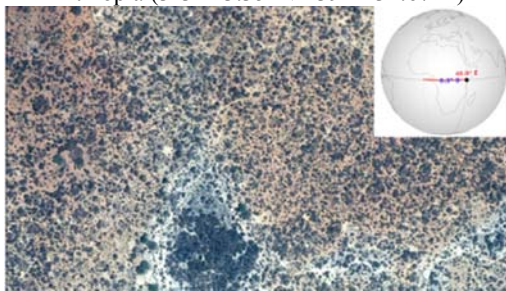
Ecuador ( $2^{\circ}11'0.86''\text{S}$  -  $80^{\circ}44'15.67''\text{O}$ )



Ethiopia ( $3^{\circ}34'23.35''\text{N}$  -  $39^{\circ}1'32.67''\text{E}$ )



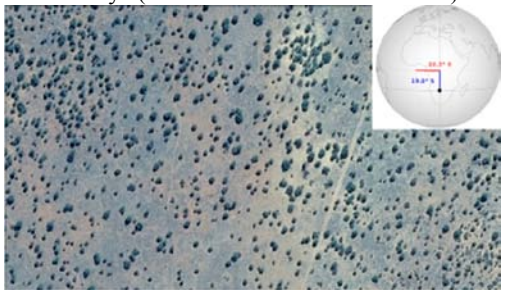
Iran ( $34^{\circ}50'16.19''\text{N}$  -  $49^{\circ}50'49.86''\text{E}$ )



Kenya ( $0^{\circ}14'13.20''\text{N}$  -  $40^{\circ}26'14.38''\text{E}$ )



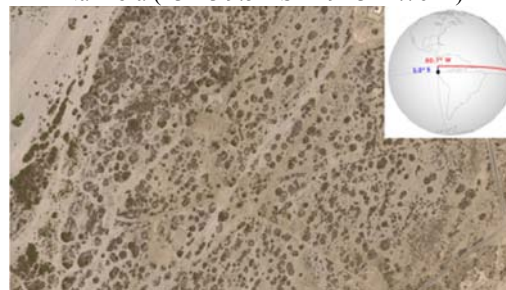
Israel ( $31^{\circ}19'34.54''\text{N}$  -  $34^{\circ}15'5.38''\text{E}$ )



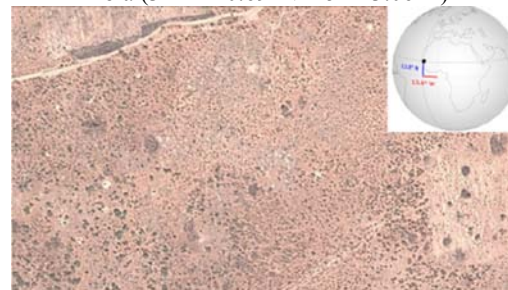
Namibia ( $23^{\circ}13'9.51''\text{S}$  -  $19^{\circ}3'11.76''\text{E}$ )



Libia ( $32^{\circ}11'40.69''\text{N}$  -  $15^{\circ}1'3.06''\text{E}$ )

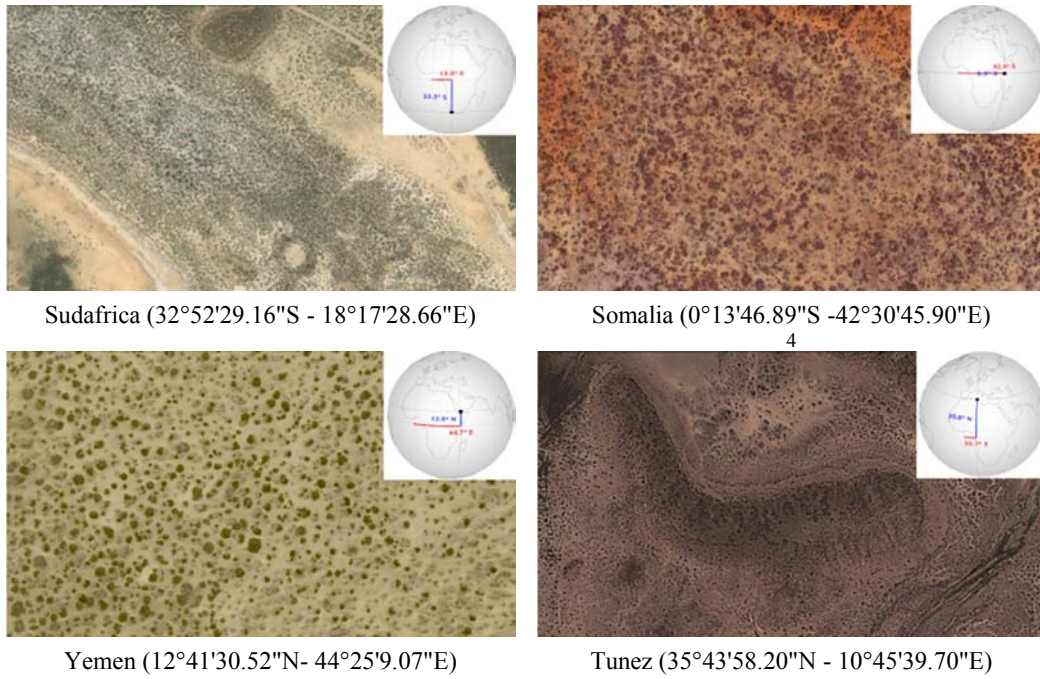


Peru ( $4^{\circ}29'8.07''\text{S}$  -  $81^{\circ}15'22.35''\text{O}$ )



Senegal ( $13^{\circ}45'41.86''\text{N}$  -  $13^{\circ}44'49.81''\text{O}$ )





**Figura 34.** Muestras de algunos lugares con presencia del patrón leopardo alrededor del mundo, identificados con el modelo de distribución potencial.

### 3.2 PATRÓN LEOPARDO EN LA GUAJIRA

En la península de la Guajira desde el año 2007 (Figura 37) se pudo observar con las imágenes de satélite disponibles en alta resolución como aparecía uno de los dos patrones típicos de las zonas áridas, debido a lo apartado de la zona, su difícil acceso y las duras condiciones climáticas no se pudo realizar una verificación sobre el terreno hasta el año 2012. En un recorrido por toda la península, se mapearon las coberturas presentes a escala 1:100.000 con imágenes de resolución media tipo ALOS (10m) junto con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (Figura 35).

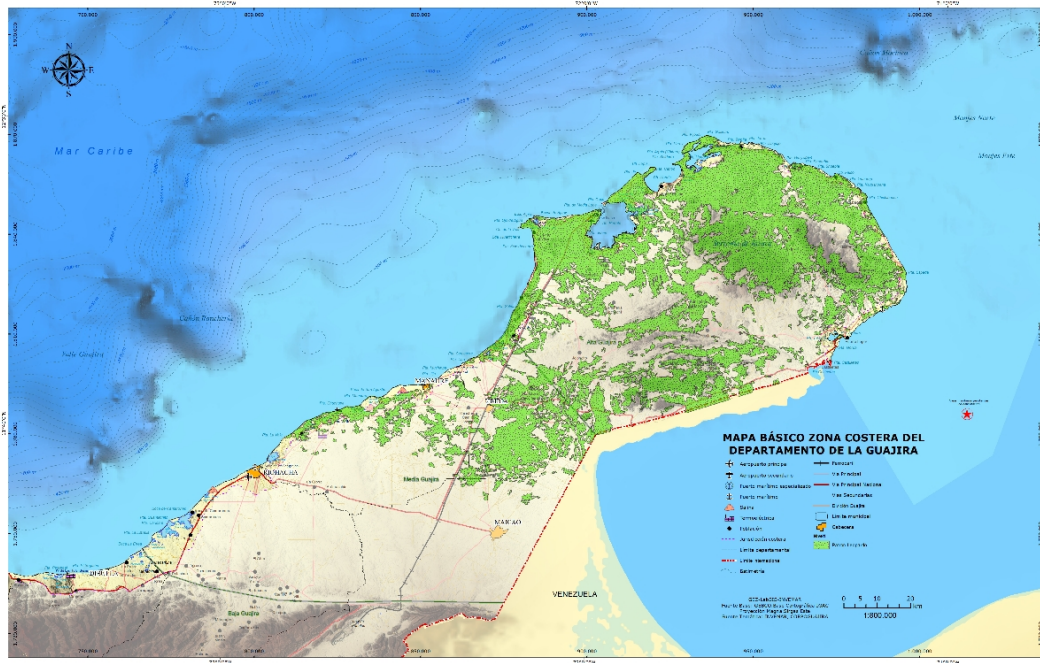
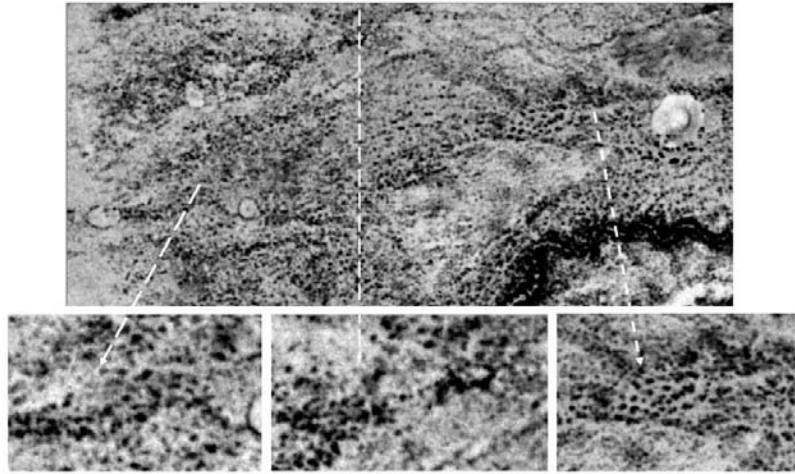
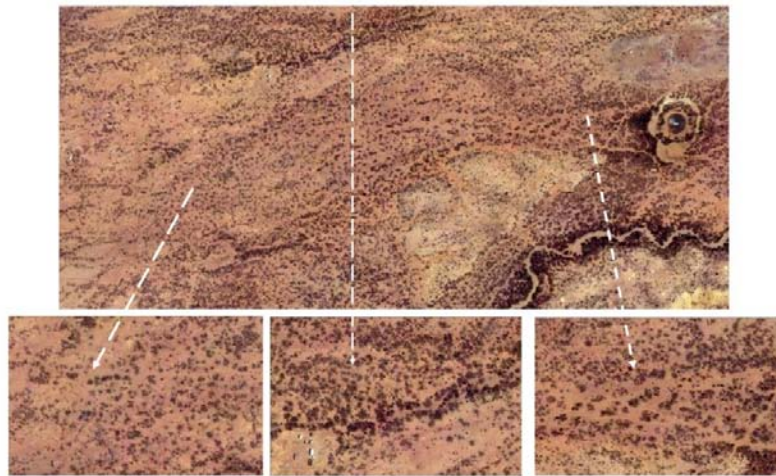


Figura 35. Distribución del Patrón Leopardo en Colombia 2012.

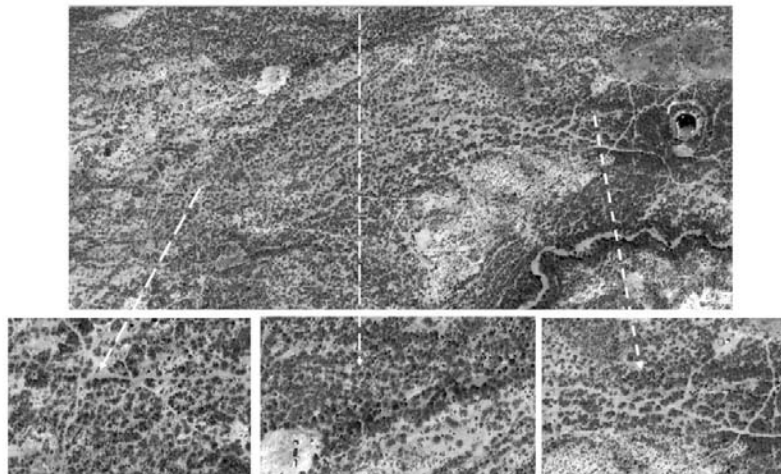
Dentro de esta metodología las clases correspondiente al patrón Leopardo coincide en la leyenda nacional de coberturas con las clase en nivel 3 estas son arbustos y matorrales, tierras desnudas o degradadas y vegetación esclerófila y/o espinosa; teniendo en cuenta esto la extensión del patrón en Colombia abarca un área de 4600 km<sup>2</sup> ubicándose en su mayoría en el área de la península de la Guajira. Posteriormente se pudo acceder a una imagen actualizada año 2013 (Figura 38) y a una imagen histórica año 1965 (Figura 36), con las cuales se pudo analizar la evolución multitemporal de las coberturas, realizando el análisis a nivel local mucho más detallado.



**Figura 36.** Muestras del patrón Leopardo en el área de estudio satélite Corona en 1965.



**Figura 37.** Muestras del patrón Leopardo en el área de estudio satélite QuickBird en 2007.



**Figura 38.** Muestras del patrón Leopardo en el área de estudio satélite Eros B en 2013.

### 3.2.1 Materiales

Para poder recolectar información útil dentro de los procesos de análisis se compraron algunos instrumentos y datos específicos, así como, se accedió a información disponible en dependencias públicas y privadas con información relevante para el estudio. Los materiales utilizados se han clasificado según su función en cartográfico, estadístico e instrumentación. Los materiales cartográficos utilizados fueron datos geográficos digitales e imágenes de satélite de alta resolución. Todas las capas resultantes de los procesos de campo y de los distintos análisis fueron revisadas en cuando a proyección, topología y metadatos.

#### 3.2.1.1 Datos cartográficos

Los datos cartográficos utilizados fueron obtenidos de las distintas fuentes oficiales estos se resumen en la tabla 11.

**Tabla 11.** Información cartográfica general utilizada en el trabajo.

Material	Escala	Fuente	Año	Formato	Cubrimiento
Carta Base	1:25.000	IGAC	1970	Shp	Local (Área de estudio)
Carta Geológica	1:100.000	INGEOMINAS	2009	Pdf,Shp	Local (Área de estudio)
Capa de suelos	1:100.000	IGAC	2009	Pdf,Shp	Local (Área de estudio)
Capa de cobertura	1:100.000	IDEAM	2012	Shp	Local (Área de estudio)
Capa de geomorfología	1:100.000	INVEMAR	2007	Shp y pdf	Local (Área de estudio)
Capa temperatura	Mundial	WorldClim	1950-2000	Tiff	Global
Capa precipitación	Mundial	WorldClim	1950-2000	Tiff	Global
Topografía (SRTM)	Mundial	CIAT	2007	Tiff	Global
Índice de aridez	Mundial	CIAT	1950-2000	Tiff	Global
Radiación solar	Mundial	CIAT	1950-2000	Tiff	Global
Harmonized World Soil	Mundial	FAO	2012	Tiff	Global

#### 3.2.1.2 Imágenes de satélite y fotografía aérea

Con el fin identificar rasgos espaciales precisos se pudo acceder a varias imágenes de satélite de diferentes años. La primera imagen con la que se pudo contar fue una imagen del Quickbird (Tabla 12) del año 2007 perteneciente al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras de Colombia (INVEMAR), está contenía 4 banda multiesprectrales MS1 a 2.4m fusionadas a 0.67m (Figura 39), la siguiente imagen utilizada fue tomada bajo pedido por la compañía ImageSat con el satélite Israelí pancromático de alta resolución Eros B (Tabla 13 ), se tomó un estereopar satelital en 2013 (Figura 40) y finalmente se compró una imagen de archivo del satélite espía desclasificado Corona KH-4B(Figura 41) del año 1965 (Tabla 14).También se utilizaron los servicios de imágenes de satélite en línea BingMaps y Google Earth, así como, el servicio del plan nacional de fotografía aérea (PNOA) para la búsqueda de datos en España disponible a través del IGN.

**Tabla 12.** Metadatos imagen de satélite QuickBird 2007/03/15.

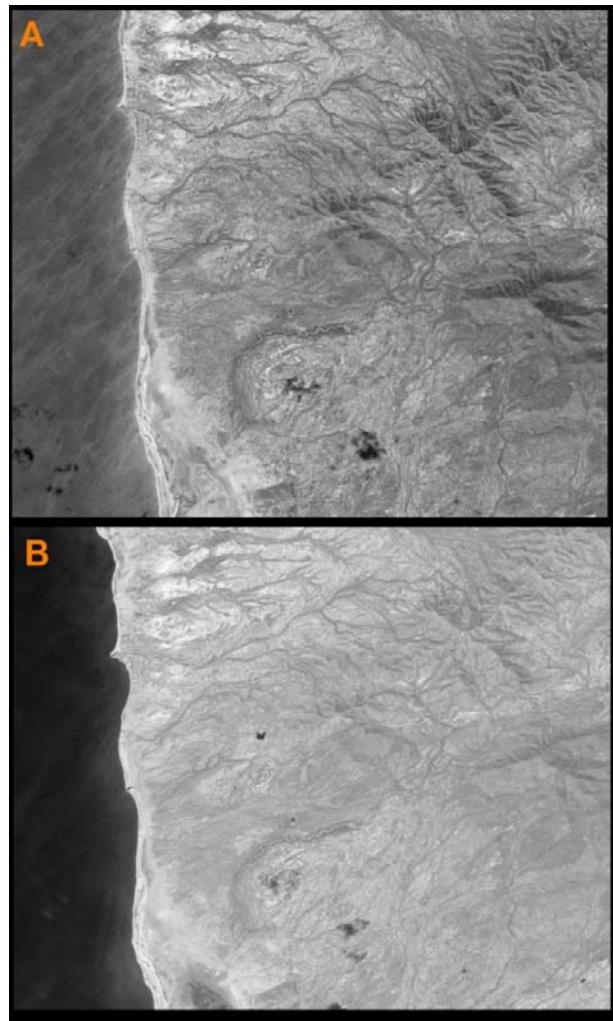
Metadato	Imagen 1
Imagen fuente ID	QB02
Producto imagen ID	1010010005867100
Sensor	QuickBird
Escaneo cruzado	0.67 m
Escaneo a lo largo	0.90 m
Ms1	2.4 m
Dirección de escaneo	Reversa
TDI Modo	Pan, MS1
Colección Nominal Azimut	96 grados
Colección Nominal Elevación	20.41 grados
Ángulo Azimut del Sol	20.13 grados
Ángulo Elevación del Sol	51.72776 grados
Adquisición Día/Hora	2007-03-20 15:40 GMT
Porcentaje de nubes	0



**Figura 39.** Imagen de satélite QuickBird 2007 del Cabo de la Vela.

**Tabla 13.** Metadatos Estéreo imágenes del satélite Eros B 2013/02/06.

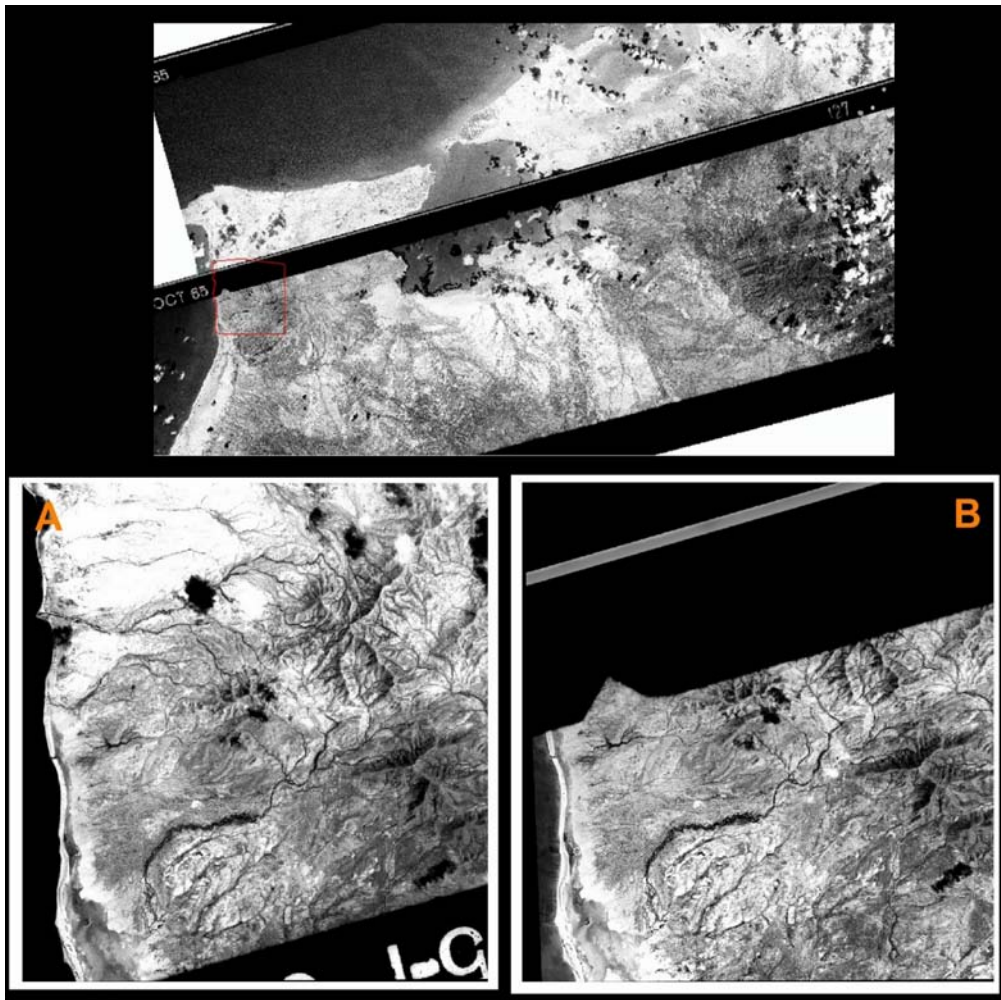
Metadato	Imagen 1 (A)	Imagen 2 (B)
Imagen fuente ID	MBT1-e2376518	MBT1-e2376519
Producto imagen ID	MBT1-e2376518	MBT1-e2376519
Sensor	Eros-B	Eros-B
Escaneo cruzado	0.74 m	0.74 m
Escaneo a lo largo	1.00 m	1.00 m
Azimut de escaneo	180.00°	180.01°
Dirección de escaneo	Reversa	Reversa
Pancromático TDI Modo	CCD-TDI	CCD-TDI
Colección Nominal Azimut	24.0 grados	24.3 grados
Colección Nominal Elevación	180.0 grados	180.0 grados
Ángulo Azimut del Sol	257.26 grados	257.36 grados
Ángulo Elevación del Sol	57.42 grados	57.31 grados
Adquisición Día/Hora	2013-02-06,18:13:24 GMT	2013-02-06,18:14:13 GMT
Porcentaje de nubes	1	1



**Figura 40.** Imágenes estereoscópicas (A izq. B der.) de satélite Eros B 2013 del Cabo de la Vela.

**Tabla 14.** Metadatos Estéreo imágenes del satélite Corona KH-4B, 1965.

Metadato	Imagen 1	Imagen 2
Imagen fuente ID	DS1025-1014DA009	DS1025-1014DA010
Producto imagen ID Mision	1025-1	1025-1
Sensor	Corona KH-4B	Corona KH-4B
Escaneo cruzado	2.00m	2.00m
Direction Flag	014 grados	014 grados
Image Type	Black and White	Black and White
Camera Type	Aft	Aft
Camera Resolution	Stereo Medium	Stereo Medium
Film Type	70mm Panoramic	70mm Panoramic
Generation	2	2
Polarity	Negative	Negative
Direction Flag	014D	014D
Adquisición Día/Hora	1965/10/06	1965/10/06
Porcentaje de nubes	2	2



**Figura 41.** Imágenes estereoscópicas (A sup. B inf) del satélite Corona KH-4B 1965 del Cabo de la Vela.

### 3.2.1.3 Información meteorológica local

Estos datos fueron recolectados de fuentes fiables en Colombia, para el caso de los datos meteorológicos (temperatura y precipitación) se consultó la información disponible en el sistema de información ambiental del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Los datos con información útil en los que las estaciones meteorológicas no tuvieran interrupciones o faltas de información en largos periodos fueron utilizados dentro del análisis (Tabla 15) algo muy importante ya que la zona registra muchas estaciones (Figura 42) con periodos de inactividad prolongados lo que podría afectar en un análisis temporal. La información de la velocidad y dirección del viento por parte de la entidad oficial en la península es muy poca o casi inexistente, debido principalmente a que esta información se recolecta en estaciones de primer orden (aeropuertos, capitales, puertos) la gran mayoría de información recolectada por las estaciones en Colombia son meteorológicas y se limitan a temperatura, humedad, precipitación y brillo solar. La Guajira es una zona donde los vientos tienen una magnitud considerable para ser aprovechada en la producción de energía por esta razón existen varios proyectos de parques Eólicos (Figura 43), los principales datos disponibles sobre los vientos en la región son recolectados con estos fines por estaciones privadas como las de las Empresas Públicas de Medellín (EPM). Se pudo tener acceso a la información completa del año 2012 (Tabla 16), la cual se utilizó para caracterizar el área en cuanto a la dinámica de los vientos, teniendo en cuenta que la información de carácter nacional es inexistente en este aspecto y los registros en la península solo se iniciaron alrededor del año 2004.

**Tabla 15.** Ejemplo de datos meteorológicos de temperatura media mensual 2013 IDEAM.

CODIGO	Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
1507503	Manaure	27,7	27,5	27,7	28,2	29,4	30,2	30,3	29,8	29,4	28,8	28,6	28,0	28,8
1507501	Bahia Honda	26,8	26,9	27,1	27,7	28,7	28,8	28,7	29,1	29,1	28,7	28,2	27,2	28,1
1507506	Puerto Bolivar	27,0	26,9	27,3	28,0	28,9	29,4	29,3	29,4	29,3	28,8	28,5	27,7	28,4
1507504	Uribia	28,1	28,5	29,0	29,2	29,8	29,9	30,0	30,1	29,6	28,5	27,8	28,2	29,1
1508504	Rancho Grande	27,6	27,6	28,1	28,8	29,2	29,6	29,7	29,9	29,6	28,8	28,7	27,9	28,8
1508502	Nazareth	25,6	25,7	26,0	26,6	27,2	27,6	27,5	28,0	28,2	27,7	27,0	26,2	26,9



**Figura 42.** Estaciones meteorológicas sin falta de información en la Alta Guajira.





**Figura 43.** Estacion de medición de viento en la Guajira (A) Parque eólico Jepírachi (B).

**Tabla 16.** Ejemplo de datos meteorológicos de velocidad media mensual del viento (m/seg) (EPM, 2012).

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Araparen	15,6	15,2	15,4	14,0	14,3	12,1	14,0	15,9	11,0	12,1	11,1	14,0	13,7
Jepirrachí	14,0	14,2	15,5	14,0	14,6	13,7	13,0	11,1	0,0	11,0	8,5	10,4	11,7
Kasiwoulin	13,2	14,0	12,9	0,0	0,0	0,0	9,9	11,0	9,8	10,1	12,1	10,7	8,6
Mauripao	16,6	16,8	18,0	15,0	15,7	14,0	15,0	12,2	11,9	11,4	17,6	12,6	14,7
Amushishao Punta Coco	14,1	14,5	14,8	13,0	14,3	12,2	14,0	11,7	12,5	10,4	11,1	10,6	12,8
Puerto Estrella	13,9	14,1	12,3	11,0	13,1	12,2	13,0	11,2	11,8	13,3	13,5	13,0	12,7
Pactain -JASAY	17,8	16,9	16,0	16,0	15,0	13,3	15,0	14,0	12,3	11,4	11,8	13,7	14,4
Guerrero	19,3	16,2	16,2	16,0	15,1	13,7	15,0	14,2	12,1	11,4	12,0	13,4	14,6
Kasushi	13,3	13,3	14,1	13,0	13,5	12,1	13,0	11,9	10,2	9,6	10,0	10,0	12,0

### 3.2.1.4 Equipos e instrumentos

Con la intención de recolectar información en campo sobre los distintos aspectos a analizar se utilizaron varios equipos digitales y análogos, estos fueron:

#### GPS

Se utilizaron dos GPS cartográficos para registrar puntos de control sobre el terreno y poder geo referenciar con la mayor precisión posible todos los datos. El GPS Trimble Juno SD, es un GPS cartográfico basado en Windows Mobile para edición de capas geográficas y visualización de imágenes, tiene una precisión de 1 a 2.5 metros (Figura 44). El GPS Thales Mobile Mapper es un GPS cartográfico de alta precisión para levantamientos geodésicos con detalle sub métrico, utilizado para obtener puntos de control de gran exactitud.



Figura 44. GPS Trimble Juno (A) y GPS Thales Mobile Mapper (B).

### Anemómetro digital

Para recolectar datos de velocidad del viento en el terreno se utilizó el anemómetro digital Mastech MS6252B con medidor de temperatura y humedad ambiental (Figura 45)



Figura 45. Anemómetro MASTECH en salida de campo

### Barreno de suelos Hoffer

Esta herramienta es utilizada en el levantamiento de suelos tradicionalmente para obtener muestras superficiales de 10 a 50 cm en el primer horizonte, se utilizó un barreno marca AMS de 7/8 pulgadas (Figura 46), con este se utilizaron la tabla Munsell de color de suelo, bolsas plásticas y marcadores para identificar las muestras recolectadas.



Figura 46. Barreno de suelo Hoffer en salida de campo

### Kit de macro nutrientes de suelo

Se utilizó un kit de evaluación de macronutrientes de suelo LaMotte Complete Soil Test Kit con tablas de evaluación visual para el análisis de pH, Nitrógeno, Fosforo y Potasio (Figura 47).



Figura 47. Kit para evaluación de macronutrientes (pH,N,P,K) LaMotte.

### Medidor de humedad de suelo

Dentro del análisis de humedad de los suelos se utilizó una sonda digital que mostrara valores de humedad relativa en suelo, para este caso se utilizó la Sonda Luster Leaf 1825 Rapitest Digital Moisture Meter (Figura 48).



Figura 48. Medidor de humedad del suelo en salida de campo

### Cámara fotográfica

Este fue uno de los instrumentos más importantes para el registro de información en campo ya que las fotografías son muy útiles en múltiples análisis, se utilizó una cámara Sony DSC-HX200V con GPS y brújula incorporados (Figura 49)



**Figura 49.**Cámara Sony DSC-HX200V.

### ***3.2.1.5 Estadísticas***

Se utilizaron datos estadísticos oficiales disponibles en diferentes fuentes los primeros datos recopilados, fueron los datos poblacionales; estos fueron obtenidos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Se utilizaron los datos censales de los años 1964, 1993, 2005, 2007, 2013. Para los análisis poblacionales de animales se utilizaron los datos del censo agropecuario nacional de los años 1965, 2007, 2013, 2016 disponibles en el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

### 3.2.2 Diseño muestral

La información recolectada en campo se considera como la información más precisa y real “estándar” con la que se puede comparar, por esta razón si los datos no son de suficiente calidad la evaluación será sesgada o incompleta. Para poder realizarla con éxito se debía conocer el área de trabajo, determinar las limitaciones y facilidades reales para un buen muestreo que permitieran recabar la mejor información en relación calidad, costo, tiempo. Del detalle con el que se colecto la información dependerán los resultados directos, para ello se utilizó el factor de escala el cual determino las muestras optimas en relación con el área.

#### 3.2.2.1 Escala de trabajo en campo

La escala expresa la razón de ampliación o reducción entre una distancia en el mapa y una distancia equivalente en el terreno (Tabla 17). Algo fundamental a la hora de definir el trabajo cartográfico fue la escala en la cual se centraron las tareas sobre el terreno, para un trabajo que cubriera toda el área se escogió una escala 1:50.000 como la escala de representación y análisis de los datos tomados en campo, teniendo en cuenta que los patrones Leopardo solo son visibles en información de alta resolución con rangos de escala de 1:50.000 a 1: 5.000.

**Tabla 17.** Escalas en relación con áreas y distancias en el terreno, área legible en papel y numero de observaciones en campo.

Escala	Distancia en el terreno	Área en el terreno	Area Mín Legible Cornell	Area Mín Legible Vinki	# Mínimo obs campo	# Máximo obs campo
	1 cm en el mapa	1 cm <sup>2</sup> en el mapa	0.4cm <sup>2</sup>	0.25cm <sup>2</sup>		
medida	m	Por m <sup>2</sup>	Por m <sup>2</sup>	Por m <sup>2</sup>	Por Km <sup>2</sup>	Por Km <sup>2</sup>
1:2.500	25	625	250	156	400	1.600
1:5.000	50	2.500	1.000	625	100	400
1:10.000	100	10.000	4.000	2.500	25	100
1:25.000	250	62.500	25.000	15.625	4	25
1:50.000	500	250.000	100.000	62.500	1	4
1:100.000	1.000	1.000.000	400.000	250.000	0.25	1

#### 3.2.2.2 Tamaño de la muestra

La definición del tamaño de la muestra es un tema clásico en el análisis estadístico tradicional y es un área que ha recibido gran atención en el análisis de clasificaciones derivadas de sensores remotos. Cada observación tiene un costo y por lo tanto su número debe ser el mínimo que satisfaga los requerimientos estadísticos y a la vez sea económicamente viable (Fallas, 2002). Teniendo en cuenta esto, se optó por un número de muestras en terreno que se mantuviera dentro del estándar mínimo (Tabla 17) de la escala 1:50.000 lo que para un área de 43 km<sup>2</sup> comprendería un mínimo de 43 a un máximo de 172 muestras por kilómetro cuadrado.

### 3.2.2.3 Esquema de muestreo

Una vez determinado el número de muestras requerido para lograr un error determinado se decidió cuál esquema de muestreo se utilizaría para asignar los puntos. Existen múltiples diseños de muestreo que pueden utilizarse para investigar la distribución espacial de fenómenos naturales, generalmente tenemos: aleatorio, estratificado, sistemático. Para la salida de campo se planteó utilizar un muestreo sistemático partiendo de una cuadrícula definida por el área de trabajo con una distancia entre muestras de 500 metros lo que arrojó un total de 169 puntos (Figura 50).

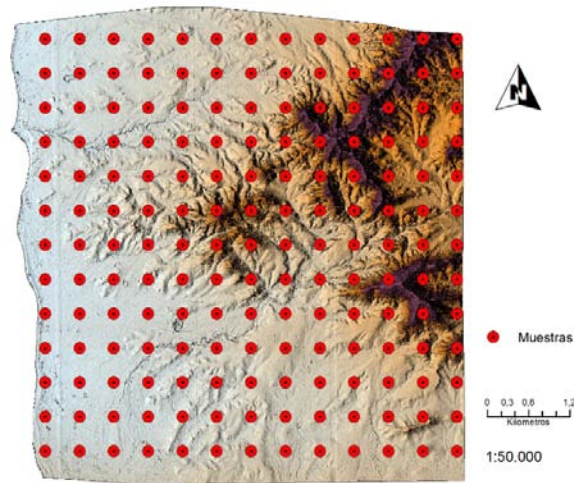


Figura 50. Muestreo sistemático para salida de campo.

## 3.2.3 Salida de campo

En el desarrollo del proceso de investigación se desarrollaron varias salidas de campo en Colombia en los años 2012 y 2014 y una salida exploratoria en España en el año 2013 con miras a tener un contacto de primera mano en los lugares donde por medio de imágenes de satélite y fotos aéreas y otras referencias se podían apreciar los patrones de vegetación a investigar.

### 3.2.3.1 Salida de campo reconocimiento península de la Guajira

La primera exploración de la península de la Guajira se realizó en el mes de julio del año 2012 durante una gira por toda la zona costera del departamento, esta inició en la bahía de Castilletes límite fronterizo con Venezuela hasta el Rio Palomino límite geográfico donde termina el departamento de la Guajira (Figura 51) y comienza su departamento vecino el Magdalena. El recorrido tuvo una duración de 3 semanas donde se realizó el reconocimiento de coberturas vegetales, toma de fotografía, toma de puntos GPS, identificación de las comunidades, análisis socioeconómicos, aspectos geológico y biológicos y de los hitos geográficos más relevantes. El objetivo de esta salida fue complementar la información para la generación del atlas marino costero que el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras de Colombia (INVEMAR) generaría en 2012. En este caso se definió una escala de trabajo 1:100.00 para el muestreo en un área de 157.000 hectáreas correspondientes a la zona costera del

departamento de la Guajira, la leyenda de coberturas utilizada para definir las clases muestréales, fue la clasificación CORINE Land cover para Colombia.

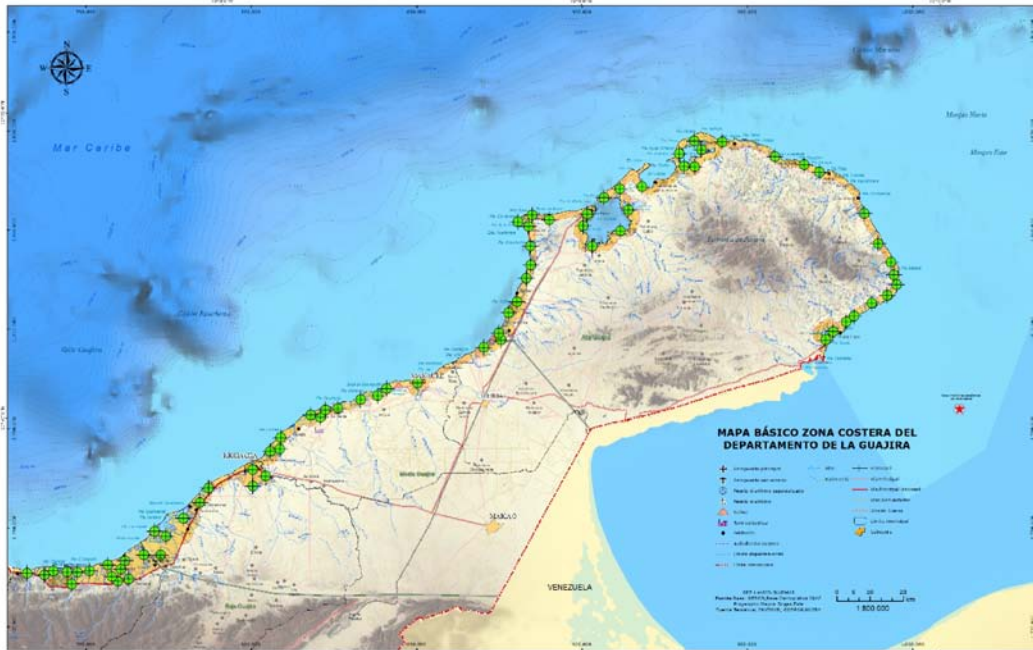


Figura 51. Puntos salida de campo zona costera de la península de la Guajira durante el año 2012.

A partir de las primeras aproximaciones al campo como parte del trabajo de este autor se pudo constatar la presencia de los patrones Leopardo a lo largo y ancho de la zona litoral y el interior peninsular; respaldando las primeras observaciones previamente echas con imágenes de satélite, las cuales revelaban que en este ambiente árido existían este tipo de formaciones vegetales. En los recorridos se pudo ver la vegetación predominante obteniéndose algunos especímenes para su identificación (Figura 52), no se logró tomar muestras de suelo pero finalmente la salida aclaró la idea general de que el patrón si se encontraba presente en el área de la Guajira.

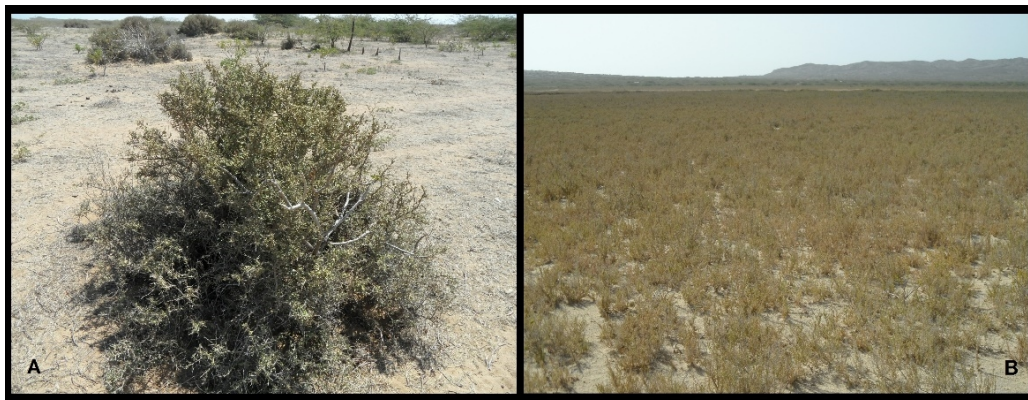


Figura 52. Primera pruebas del patrón leopardo (A) *Castela erecta* (B) *Heterostachys ritteriana*

### 3.2.3.2 Salida de campo Cabo de la vela

Luego de llevar varios años planeando una salida de campo específica para dar comienzo a los análisis sobre el terreno, se estudiaron los datos recolectados en 2012 y con nueva información cartográfica de 2013 (imágenes de satélite) se procedió a planificar una salida de campo en algún lugar representativo de la península que tuviera presencia del patrón y que permitiera desarrollar con seguridad jornadas de campo (Figura 53). Para ello se estudiaron las características de la zona, la disponibilidad de datos meteorológicos cercanos, así como, la cartografía básica y temática, facilidad de acceso y de sitios donde poder pasar la noche. Con todas estas variables presente se llegó a la conclusión de que la zona baja del Cabo de la Vela sería una muy buena área para desarrollar el trabajo, seguido a esto se realizaron los contactos con las personas del área, servicios de transporte y estadía.



Figura 53. Área de trabajo parte baja del Cabo de la Vela en la Alta Guajira.

En el instante de la salida se tuvo en cuenta que los datos recabados solo servirían para caracterizar el área en un tiempo y lugar específicos por lo que algunos de los datos que se tomaron solo tienen la finalidad de mostrar la variabilidad que se presenta en la zona en el momento de muestra y no son suficientemente largos (series de tiempo) como para emitir juicios más profundos. Algunos datos de este tipo se analizan más adelante haciendo parte del análisis como un complemento al entendimiento de la formación de patrones. Pensando en una recolección más fiable de datos se compraron algunos instrumentos para la toma de muestras, así como, la compra de información cartográfica que complementara la información ya existente con miras a un mejor y más detallado análisis. La salida de campo se llevó a cabo en los últimos días del periodo lluvioso del 28 de octubre al 14 de noviembre del año 2014 donde se analizaron los siguientes aspectos:

#### Topografía y medidas en terreno

Para localizar e identificar rasgos topográficos se tomaron medidas con los GPS cartográficos en terreno con periodos de toma de 1 hora para puntos de control topográfico y



de 2 a 5 minutos para control cartográfico, se realizaron medidas con cinta métrica sobre las distancias en terreno de algunas características (ancho de caminos, distancia de la vegetación, tamaño de los pozos de agua etc.) que ayudasen a los procesos de análisis posteriores en computador.

### **Geomorfología**

Para ubicar e identificar los procesos morfogenéticos se examinaron en terreno los indicadores físicos que demostraron la fuerte influencia eólica y de sus procesos erosivos en terreno sobre los suelos y el entorno, así mismo, se analizó el modelado costero dominante en la parte más cercana a la zona de playa. Se evidenció el origen de los materiales geomorfológicos de la zona montañosa (serranía), así como, de la amplia presencia de Glacis de erosión típico de ambientes áridos en gran parte del área.

### **Reconocimiento de suelos y macronutrientes.**

Al examinar los suelos se pudo constatar la dominancia de los Aridisoles, estos suelos se originaron por un ambiente influenciado principalmente por el clima y el origen marino de los materiales; teniendo fuertes contenidos calcáreos (carbonato cálcico) y pudiéndose encontrar en gran parte de la península. Estos suelos suelen ser de color pardo a pardo pálido. Se registró la humedad del suelo para vislumbrar la variabilidad espacial específica del momento en que se registraron los datos ya que fue en el final del periodo lluvioso. Los macronutrientes en el suelo fueron analizados de dos formas, en la primera para poder tener clara una distribución de los nutrientes en el patrón se tomaron muestras de un transecto en zonas con y sin vegetación y en la segunda se tomaron muestras solo del suelo siguiendo el sistema de muestreo.

### **Reconocimiento de la vegetación.**

La identificación de las zonas vegetales presentes en el área, se realizó de acuerdo a la accesibilidad de los lugares teniendo en cuenta que muchas zonas presentan matorrales densos con gran presencia de cactus. El estudio de la vegetación presente en el área se basó en la observación de especies vegetales, se registró con la cámara fotográfica la imagen y dentro de cada foto su registro GPS y la orientación, así mismo, se tomaron muestras de las especies dominantes para su posterior identificación.

### **Aspectos climáticos**

Se registraron datos de humedad, temperatura y velocidad del viento local en el momento de la salida de campo para tener una visión más clara del terreno y de la situación climática, estos datos se utilizaron para comprender el ambiente en el momento de campo.

### **Aspectos antrópicos**

Los aspectos antrópicos fueron una característica muy importante en la cual se identificaron los lugares de vivienda de los indígenas en terreno, se indagó de manera general sobre su modo de vida y ciclo económico básico. También se evidenciaron los efectos del ganado sobre la vegetación, el tipo de construcciones, así como, el patrón de asentamiento de la comunidad ubicada en el área de estudio.

### **3.2.3.3 Modelo de superficie (DSM)**

Los datos topográficos disponibles en el área de estudio se remontan a principios de los años 70 de muy bajo detalle y desactualizados. Para poder reconstruir un modelo de la superficie (DSM) topográfica se utilizaron pares estereoscópicos satelitales de alta resolución tomados con la plataforma EROS B. La obtención de un DSM a partir de imágenes de satélite ópticas de alta resolución espacial y su uso para la generación de información topográfica, se consideran como una alternativa metodológica práctica y asequible. Una amplia gama de procedimientos de corrección de imágenes de alta resolución por satélite (IKONOS, QuickBird y EROS) proporcionan la elevación por el proceso de ortorectificación, utilizando un conjunto de puntos de control terrestre; por tanto, la precisión resultante en la elaboración de mapas cumple los requisitos de cartografía a escala 1:10.000 (Cavallini et al., 2004). Existen en la actualidad, una gran variedad de programas informáticos que permiten el tratamiento digital de imágenes en fotogrametría, basados en planteamientos algorítmicos diferentes, que pretenden dar solución al problema de la representación numérica del relieve. El DSM es una capa de información fundamental y de éste pueden extraerse un número muy elevado de nuevos parámetros.

En cuanto al modelado 3D de imágenes estereoscópicas, diversas experiencias han sido desarrolladas con base a coeficientes polinomiales racionales - RPC (del inglés Rational Polynomial Coefficients). En este caso se utilizaron imágenes EROS B standar L1A en conjunto con los RPCs proporcionados por el satélite al momento de toma. El estudio involucró el uso del programa informático fotogramétrico comercial PCI Geomatica en su módulo OrthoEngine para la generación de un DSM y pares estereoscópicos. Se implementó la extracción por funciones racionales RPC, así como la corrección, filtrado y generación de un DTM. Para el área de estudio se definió una escala de análisis 1:10.000. Se utilizaron 2 imágenes del Sensor CCD EROS-B con un nivel de procesamiento L1A. Obtenidas con licencia Multiple Private Companies, a través del distribuidor del satélite; la empresa ImagenSat internacional.

### **3.2.3.4 Modelado de los parámetros del sensor**

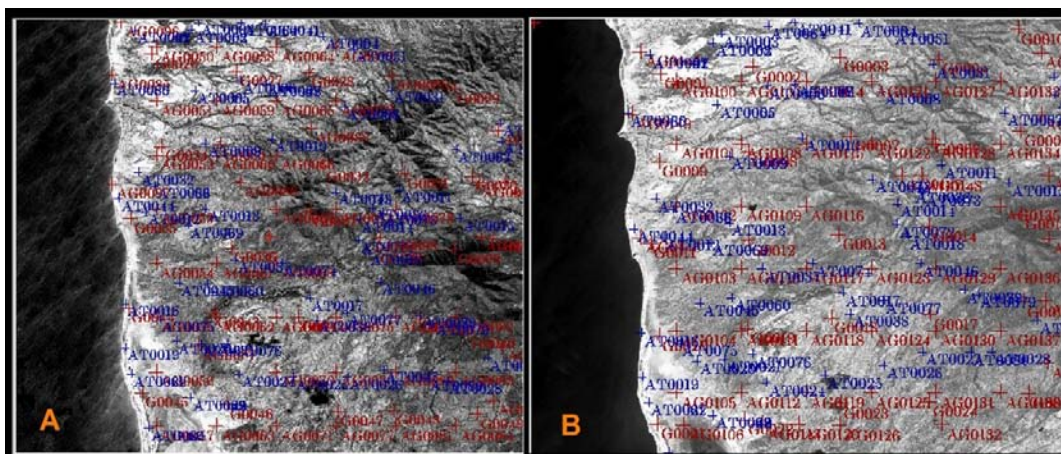
El programa informático de teledetección PCI implementa el modelo para calcular parámetros de sensor y satélite con la finalidad de corregir geoméricamente imágenes para la obtención de modelos de elevación y ortofotos. Este desarrolla ecuaciones matemáticas que vinculan la ubicación de un punto dado en el terreno con uno igual en otra imagen satelital, en base a las ecuaciones de colinealidad. Representando un modelo real de transformación entre la imagen espacial y el terreno. El modelo refleja una aproximación integral de las distorsiones geométricas generadas durante la creación de la imagen. Las ecuaciones se resuelven con pocas coordenadas de puntos de control de tierra (mínimo tres puntos), y con puntos idénticos de georreferenciación si estamos utilizando más de una imagen. La eficacia del modelo generado ha sido probada en un tercio de píxel para imágenes de satélites ópticas, siempre que las coordenadas de los puntos de control de tierra sean de buena calidad (Toutin, 1989).

El programa informático PCI Geomatica, suministra instrumentos para el desarrollo de modelos de elevación, ortofotos e imágenes estereoscópicas de alta calidad y resolución espacial, utilizando como entrada los datos del satélite, ya sea con los datos de cabecera de las imágenes originales o introduciendo los parámetro requeridos manualmente. Utilizando dos imágenes estéreo EROS B del Cabo de la vela con diferentes ángulos de visión, se obtuvo la información de los datos del satélite: órbita, datos de control y altitud, desde el encabezado o metadato de la imagen.

Se introdujeron los puntos de control del terreno GCP (Ground Control Points) tomados en la salida de campo para las dos imágenes, los puntos de control idénticos Tie Points (puntos que son ubicados en dos imágenes raster que tienen una superposición geográfica) y los puntos de verificación (Check Points) en cada imagen medida. Manipulando en conjunto la información de la órbita y la altitud con los datos de los puntos de control, se crea un modelo matemático asociado a la posición del satélite para estas dos imágenes estéreo, luego de esto se analizó el error de los puntos a partir de su RMS (Root mean square) (Tabla 18). Se tomaron 150 puntos de control, 80 puntos de enlace y 20 puntos de verificación (Figura 54).

**Tabla 18.** Valores de error resultantes en las imágenes E2376518 y E2376519

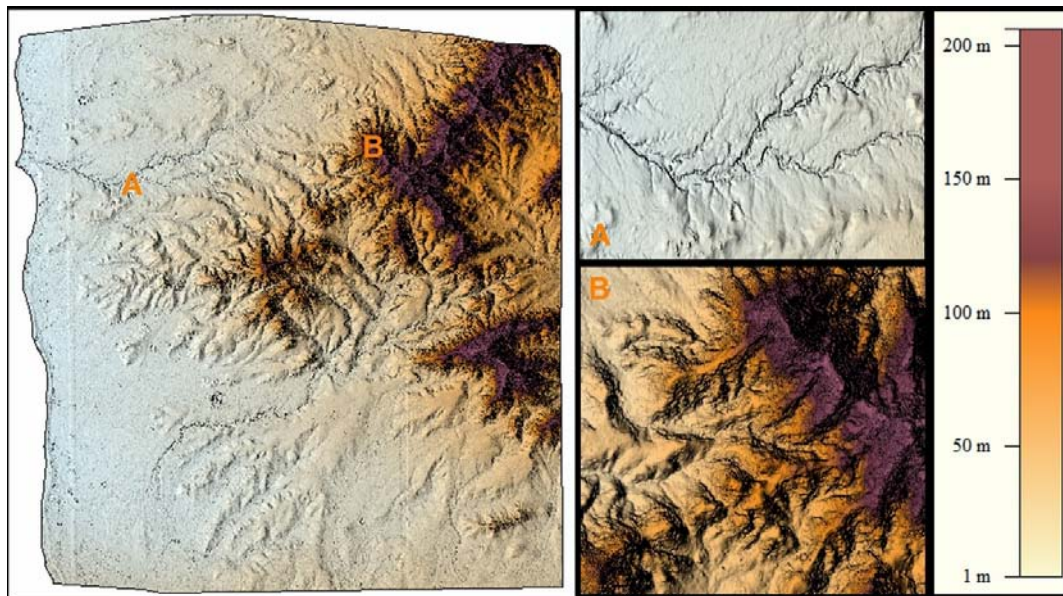
PUNTO	RESIDUAL	X: RMS	Y: RMS
1A-MBT1-E2376518	0.78	1.64	0.83
1A-MBT1-E2376519	0.99	1.90	0.91
Tie points	0.26	0.71	0.45
Check points	0.17	0.83	0.66



**Figura 54.** Puntos GCP (rojo) y Tie Points (Azul) sobre las imágenes estéreo A y B.

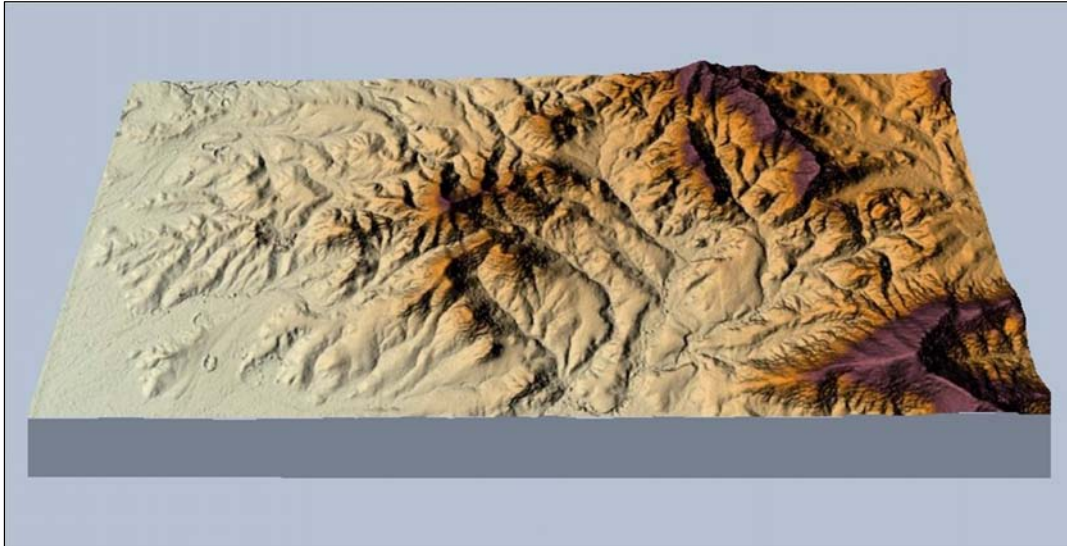
### 3.2.3.5 Generación del DSM y DTM

La creación del DSM se inicia con el cálculo de la imagen epipolar (par estereoscópico) para una de las imágenes. Esto certifica que las dos imágenes están compensadas en la dirección X del paralaje. Siendo un paso fundamental de la extracción del Modelo Digital de Superficie (DSM). Un píxel en la imagen original es localizado en la imagen con epipolaridad utilizando funciones estadísticas calculadas para el área de traslape entre imágenes (Paralaje). Se puede utilizar el promedio, el último valor o la correlación más alta de los valores de paralaje en el píxel y usarla para calcular la elevación en dicho punto. Una ventaja de utilizar la proyección epipolar es que las imágenes solo se compensan en la dirección del eje X, proporcionando una gran eficacia en el modelo. En un paso subsecuente se realizó la generación del DSM con una resolución de 2 metros (Figura 55) y se editaron las áreas donde los datos no generaron información de elevación o se calcularon de una manera errada, así como, también se utilizó la herramienta de mejora que incluyó los procesos complejos de interpolación, filtrado y suavizado, además de las funciones de enmascaramiento que reemplazaron los valores filtrados.



**Figura 55.** Modelo de superficie DSM a 2 metros (A) Zona plana (B) zona de montaña (Serranía) (Ver mapa en Anexo 4).

En fotogrametría los procesos resultantes de cálculos de paralaje entre dos imágenes generan las superficies de todos los objetos presentes al momento de la toma de los datos. La reconstrucción de la superficie 3D correspondiente a la vista de la primera faceta de la tierra contiene tanto micro relieve (edificios, árboles, etc.) como el terreno sin cobertura. Para obtener el verdadero nivel del terreno se pueden emplear diversas técnicas (aplicación de filtros, limpieza estadística de datos outlier, interpolaciones kriging entre otras). En este caso se optó por una técnica simple de limpieza de los datos con la función DSM2DTM incluida en el programa PCI Geomatica. Este proceso logró eliminar las zonas que incluían casas y pequeños cambios de elevación de los objetos presentes en los datos (Figura 56).



**Figura 56.** Modelo de terreno DTM en 3D donde se aprecia parte de la serranía de carpintero.

La precisión del DSM depende en gran medida del área de traslape en las escenas, del desplazamiento temporal de estas y de la calidad de los puntos de control. Generalmente, la evaluación de la calidad de los DSM y DTM se hace a través de la medición del RMS entre la elevación considerada por el modelo y mediciones precisas de puntos conocidos. Para este caso, el análisis arrojó una precisión admisible con un error de 1.77 metros en promedio para el área de sobre posición, comparado con los puntos de terreno tomados con GPS submétrico. Teniendo en cuenta que el análisis del área fue a una escala 1:10.000, el DTM resultante del proceso de limpieza del DSM logró generar una superficie ajustada a la realidad con un rango de precisión dentro de los 2.0 metros de error comparando estadísticamente los datos altimétricos de campo. Se obtuvo un buen nivel de confianza en la elevación resultante porque el error medio cuadrático se encuentra por debajo del nivel admisible (Tabla 19) para la escala 1:10.000 que sería alrededor de 8.5 metros.




**Tabla 19.** Error máximo esperado según variación de escala (tomado de Fallas, 2002)

Escala	Error (m)
1:1200	1.0
1:2400	2.0
1:4800	4.1
1:10000	8.5
1:20000	16.9
1:25000	12.7
1:40000	20.3
1:50000	25.4
1:63600	32.2
1:75000	38.1
1:100000	50.8
1:150000	76.2
1:200000	101.6


### 3.2.3.6 Mapas de cobertura y usos del suelo




En el desarrollo del proceso de investigación se analizaron tres tipos de imágenes satelitales de alta resolución con el objetivo de obtener la información más detallada posible sobre el estado de la cobertura vegetal en los años donde la alta resolución era accesible (1965, 2007, 2013). La leyenda utilizada para clasificar las coberturas de la tierra a escala 1:10.000 se basó en que los patrones Leopardo solo los generan unas pocas especies vegetales, por consiguiente solo se manejan tres entidades clasificatorias (Tabla 20). En la generación de las clases que tienen que ver con el uso del suelo se generaron entidades geométricas a parte de las capas de cobertura para ser analizadas de manera independiente (Tabla 21).

**Tabla 20.** Clases utilizadas para clasificar las coberturas vegetales.

Cobertura	Descripción	Imagen
Suelo desnudo	Se refiere a aquel que no cuenta con una capa superficial continua que lo proteja de la intemperie, por lo que sufre a recibir daños por agua o viento	
Arbustal	Grupo de especies principalmente arbustivas y cactáceas que conforman asociaciones vegetales	
Vegetación baja	Es la de cobertura baja de vegetación que desarrolla en suelos arenosos sobre la zona costera que conforman asociaciones vegetales	

**Tabla 21.** Clases utilizadas para clasificar los usos del suelo.

Cobertura	Descripción	Imagen
Camino	Son todos los caminos visibles generados por el tránsito de vehículos, personas y animales.	

Corral	Lugar donde se resguardan los animales (en su mayoría ungulados)	
Ranchería	Es un grupo de ranchos o chozas que conforman un poblado habitados por la comunidad indígena Wayúu	
Jaguey	Depósito de agua superficial para abastecimiento humano y animal	

### 3.2.3.7 Corrección y calibración

La corrección radiométrica involucra diferentes errores en el sensor que generan valores erróneos a la hora de interactuar con la atmósfera, alterando los valores de radiancia recibidos por el satélite, este proceso elimina las distorsiones que llegan al sensor desde la superficie terrestre. La imagen del satélite QuickBird del año 2007 fue adquirida en nivel de procesamiento 2A presentando una cobertura nubosa del 0 % y un nivel de corrección radiométrico previo de satélite. Al igual que la imagen de satélite EROS B de 2013, esta presentaba una cobertura nubosa de 0 % y traía correcciones radiométricas previas, al ser 2A ninguna de las imágenes presento bandeado ni pixeles o líneas perdidas. La siguiente imagen analizada en sus posibles deficiencias fue la imagen del satélite más antiguo en este caso el Corona de 1965, estas imágenes no son digitales siendo el resultado de un escaneo de alta resolución sobre los films fotográficos no teniendo la posibilidad de realizar ninguna corrección radiométrica; no obstante la calidad de las imágenes es buena y tiene un 1% de nubes en la zona de análisis.

### 3.2.3.8 Georreferenciación y orthorectificación

En general, las imágenes de satélite pueden venir procesadas en diferentes niveles, el nivel 0 es la imagen cruda sin ningún tipo de procesamiento, el nivel 1A incluye las correcciones radiométricas, el nivel 1B realiza las correcciones geométricas debidas a distorsiones sistemáticas en la geometría de las imágenes, tales como, líneas de exploración mal alineadas y tamaños no uniformes de los pixeles y el nivel 2A asigna una corrección geométrica donde ubica los pixeles en el espacio geográfico corrigiendo las posibles distorsiones de proyección

cartográfica estándar basada en una predicción de donde estaba el satélite cuando la imagen fue adquirida. Estas imágenes pueden tener un error de localización hasta de 50m. Como se mencionó anteriormente las imágenes más modernas EROS B y QuickBird son nivel 2A teniendo una ubicación bastante buena sobre el terreno a diferencia de la imagen Corona la cual no traía ninguna referencia y se clasifica en el nivel 0 cruda y sin ningún tipo de procesamiento. De esta manera, al contar con dos imágenes de nivel 2A es posible tomar el sistema de referencia asignado y utilizarlo para esta parte del proceso. La imagen cruda se pudo georreferenciar a partir de la información de las imágenes previamente referenciadas 2A, ya que en campo se recopilaban los puntos de control definitivos para realizar las correcciones geométricas precisas de todas las imágenes. Este proceso conllevó la transformación de las coordenadas de los píxeles de la segunda imagen (Corona) de tal forma que coincidan de manera precisa con las de la primera (Eros B). Se realiza mediante una transformación polinomial de segundo grado que se obtiene a partir de un conjunto de pares de puntos de control de ambas imágenes. Luego de tener las imágenes georreferenciadas se procedió a realizar la última corrección geométrica: la corrección del efecto topográfico sobre las imágenes de satélite, para lograr corregir esto se aplicó el proceso de orthorectificación. Este procedimiento corrige los desplazamientos causados por la inclinación del sensor, el relieve del terreno y la curvatura de la Tierra. Para efectuar este paso, el principal insumo es un modelo de elevación en conjunto con los datos específicos del sensor en el momento de toma (Metadatos) y los puntos de control tomados en campo. Se procesaron todas las imágenes usando el software OrthoEngine de PCI Geomatica y el modelo de elevación resultante de los estereopares de EROS B las imágenes orthorectificadas fueron evaluadas visualmente realizando de mejor manera los contornos de las zonas montañosas y disminuyendo el efecto topográfico (Figura 57).

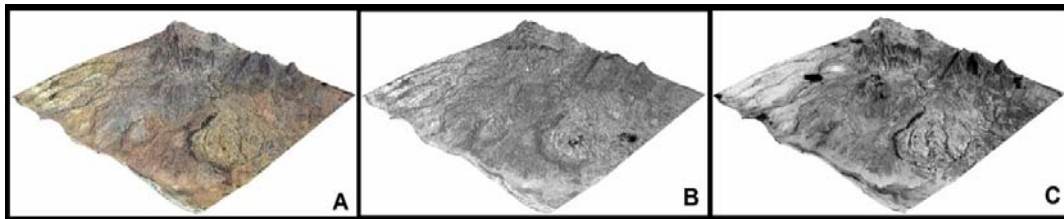


Figura 57. Imágenes orthorectificadas QuickBird (A) EROS B (B) Corona (C) en perspectiva 3D.

### ***3.2.3.9 Segmentación de imágenes y clasificación***

La segmentación es el proceso de dividir una imagen en segmentos que tienen características similares espectral, espacial y/o de textura. Los segmentos de la imagen idealmente corresponden a características del mundo real. Para la segmentación de las imágenes se hizo uso del programa ENVI. Este contiene un módulo para la clasificación de los segmentos de una imagen (Feature Extraction). Este módulo maneja una metodología híbrida entre una clasificación basada en píxeles y una basada en la segmentación. La extracción de características utiliza un enfoque basado en objetos para clasificar las imágenes, donde un objeto (también llamado un segmento) es un grupo de píxeles con espectro similar y/o atributos de textura. Con la función Rule Based Feature Extraction Workflow se creó una imagen de segmentos para cada satélite; en el módulo Object creation se desarrolló de forma interactiva los



sitios de entrenamiento basados en el nivel de la escala y el nivel de fusión de cada segmento (Figura 58).

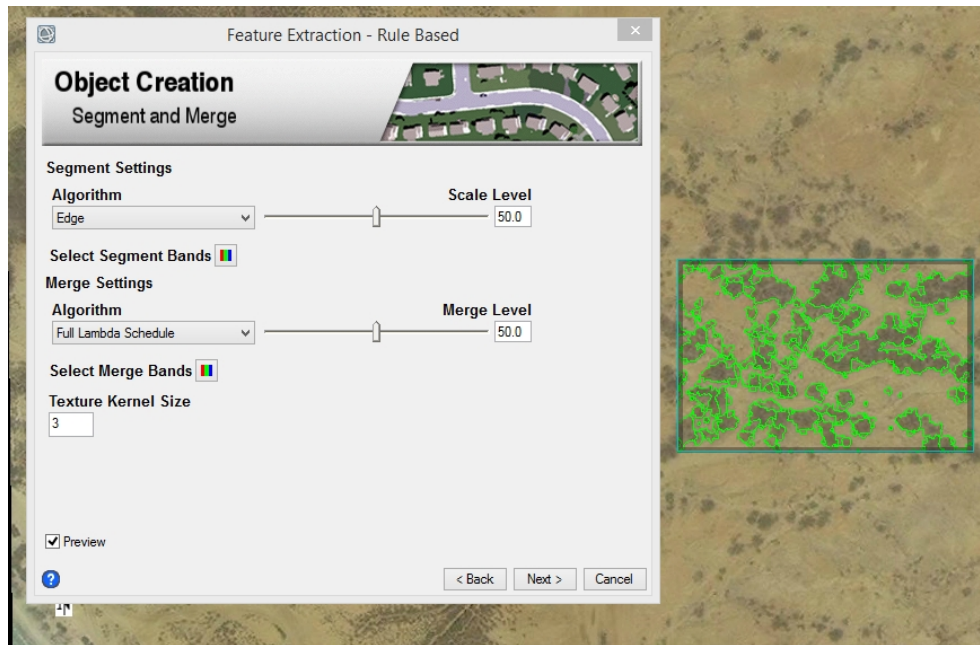


Figura 58. Interfaz del proceso de segmentación en el programa ENVI.

El flujo de trabajo consiste en dividir una imagen en muchos segmentos y el cálculo de los diversos atributos de esos segmentos, a continuación, se desarrollan la construcción de reglas para clasificar las características de interés. Cada regla contiene uno o más atributos tales como área, longitud o textura, que se constriñen a un rango específico de valores. En el módulo Rule Based (Figura 59) se utilizó un clasificador de reglas paramétricas basado en la clasificación interactiva del histograma dentro de cada segmento para poder aislar las 3 clases definidas anteriormente. Finalmente se exportan las clasificaciones en formato vectorial tipo Shape de ArcGis.

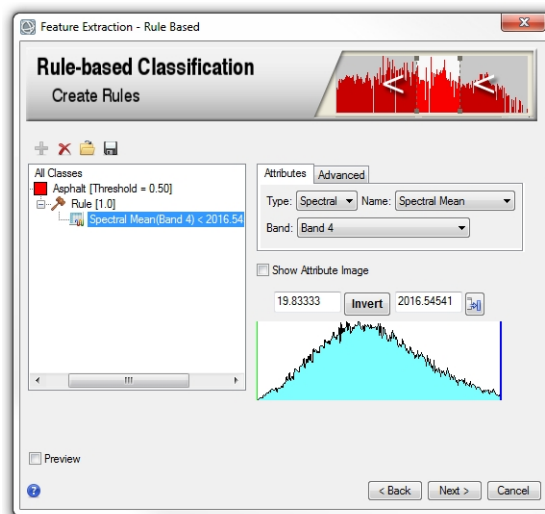


Figura 59. Interfaz creación de reglas en el programa ENVI.

### 3.2.3.10 Mapas de cobertura y uso

Los mapas de cobertura (1965, 2007,2013) fueron el resultado de aplicar la tabla de atributos (Tabla 21) para poder diferenciar las clases requeridas, el proceso de segmentación aisló con gran detalle las coberturas presentes en el área. Las características del uso del suelo como caminos, rancherías, jaguey y corrales fueron digitalizados en pantalla de forma manual para todos los años (Figura 60, 61 y 62).

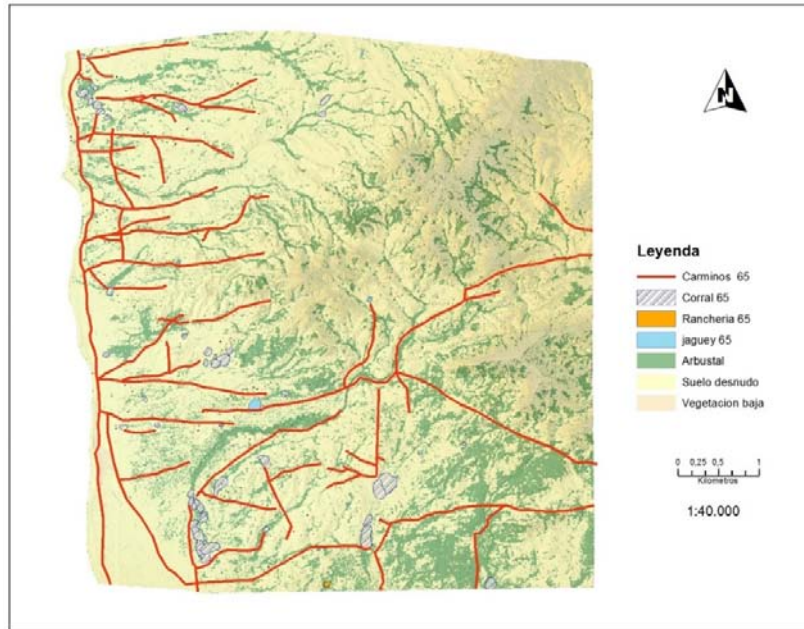


Figura 60. Mapa resultante de cobertura y capas de uso del suelo para 1965 (Ver mapa en Anexo 3).

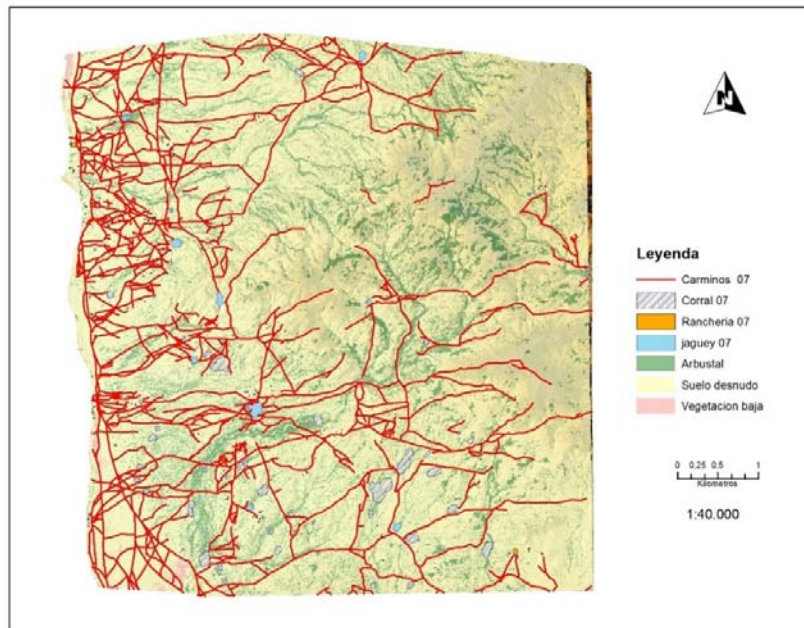
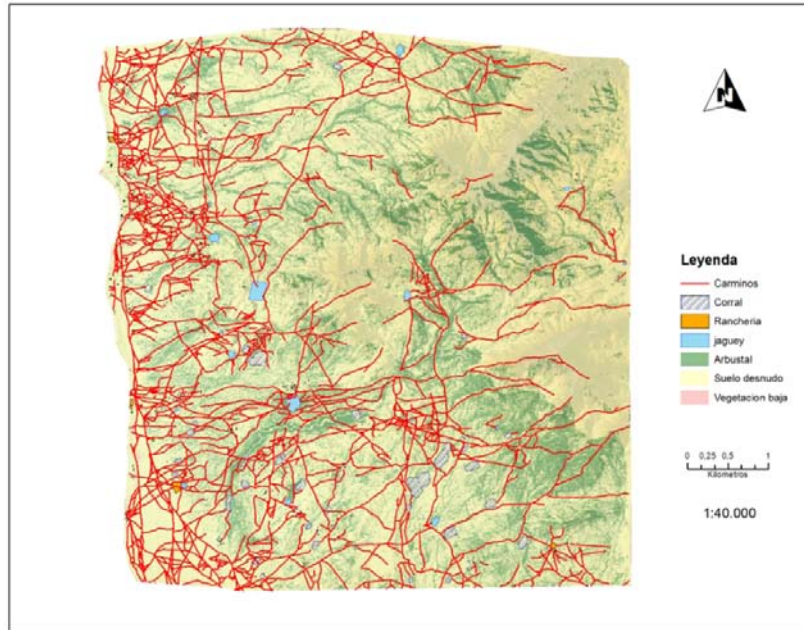


Figura 61. Mapa resultante de cobertura y capas de uso del suelo para 2007 (Ver mapa en Anexo 4).



**Figura 62.** Mapa resultante de cobertura y capas de uso del suelo para 2013(Ver mapa en Anexo 5).

### ***3.2.3.11 Evaluación de precisión de los mapas de cobertura***

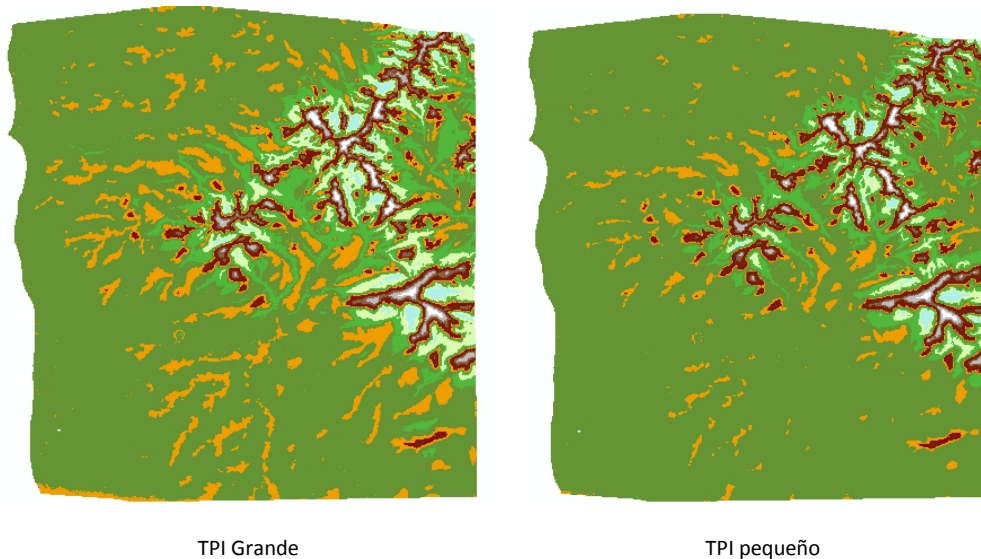
Para realizar una evaluación estadística de los mapas obtenidos, se utilizó el coeficiente kappa, que es uno de los más empleados para la evaluación de resultados en procesos de clasificación o interpretación visual de imágenes de satélite (Chuvienco, 1996). La ventaja de este coeficiente radica en el hecho que estima los errores de clasificación en cada una de las clases, es decir, es un valor ponderado de la calidad completa de la clasificación aproximándose más a la realidad (Congalton, 1991). El valor de kappa es obtenido a partir de una matriz de confusión, que tabula la cantidad de aciertos y errores en la clasificación. Para determinar la verdad en terreno se hace una distribución al azar de puntos considerando el total del área de estudio y encontrando en cada punto la categoría considerada correcta. Los valores de referencia en la matriz de confusión debe ser la verdad en terreno, la cual se dispone en las columnas mientras que los valores de la clasificación quedan en las filas. El resultado de las matrices de confusión fue de 0.9312, para el año 2013, 0.9521 para el año 2007 y 0.9165 para 1965, siendo unos resultados altos debido a la poca cantidad de clases y al nivel de detalle obtenido en la cobertura al realizar el proceso de segmentación.

### **3.2.4 Insumos fisiográficos**

El sistema CIAF de clasificación fisiográfica del terreno se basa en la posibilidad de identificar y caracterizar las unidades del paisaje con base en sus indicadores externos síntesis. Esto facilita en gran medida el análisis del paisaje debido a la existencia de tecnologías (Geomorfometría, SIG, PR) que permiten analizar de manera cuantitativa la realidad geográfica de un territorio, y técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes (TPI) que permiten realizar de una manera más rápida y eficiente la interpretación de parámetros básicos del paisaje con miras a la aplicación de un sistema de clasificación fisiográfico.

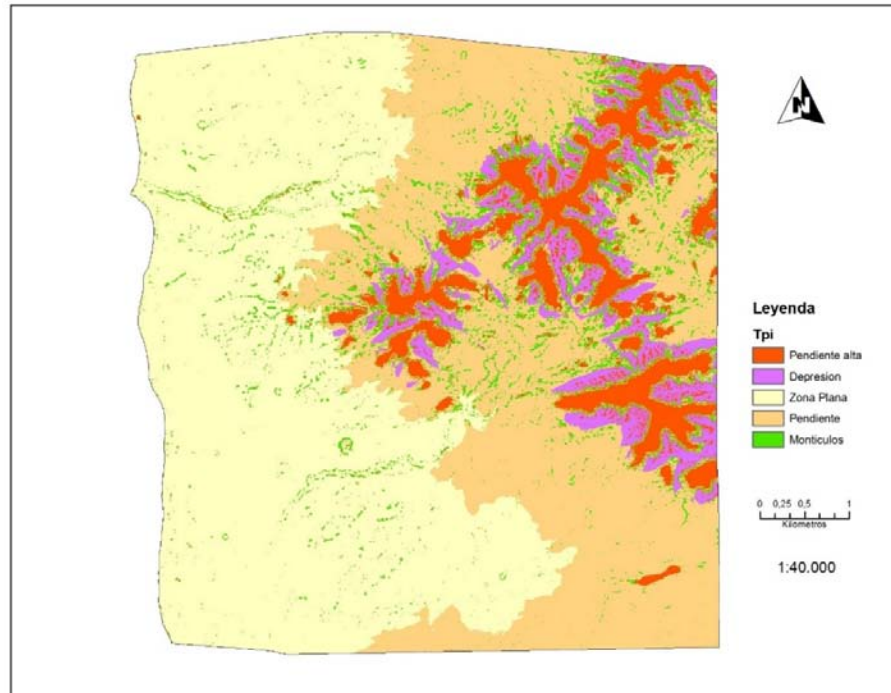
### 3.2.4.1 Mapa de índice de posición topográfica TPI

El mapa fue obtenido del procesamiento del modelo de elevación y a través de la extensión Benthic Terrain Modeler de ArcGIS. Dentro del desarrollo del modelo de TPI se aplican dos conceptos básicos: la elaboración de dos índices de posición topográfica uno grande y otro pequeño, los cuales se fundamentan en realizar un cálculo de la media focal donde las celdas de elevación son comparadas con las celdas vecinas dentro de un área definida. Los valores de las cuadrículas son convertidos a enteros, todo esto arroja que los valores positivos del TPI corresponden a regiones altas dentro del área circundante y pueden ser asociados a cerros y cordilleras, los valores negativos denotan características y regiones bajas dentro del área circundante, y son asociadas a valles. Cuando el TPI es cero está asociado a regiones planas o bien en áreas de inclinación constante cercanas a cero (Figura 63).



**Figura 63.** Modelos TPI para cálculos de media focal.

Al tener los datos agrupados y generados los archivos de salida con los datos en valores enteros calculados en base a su desviación estándar, se procede a elaborar un esquema para realizar la clasificación de las geoformas; basándose en una serie de condiciones que asignan las clases. Dichas condiciones se fundamentan en determinar los cuatro grandes grupos, dentro de los cuales se pueden clasificar las formaciones terrestres. Estos grupos son determinados por su forma expresada matemáticamente y representada en, cóncavo, convexo, plano e inclinado. Otro criterio base que se tiene en cuenta para desarrollar el modelo, es la pendiente, un aspecto fundamental que define en gran parte el área que abarcan las unidades interpretadas y da el umbral para distinguir la zonas planas e inclinadas presente dentro del modelo de elevación. Para lograr agrupar las clases se utilizaron los criterios básicos obtenidos mediante el TPI grande más los criterios definidos por el TPI pequeño, lo cual dió como resultado que se pudieran aislar cinco grandes clases. Éste también se relaciona al mapa de subpaisajes correspondiente dentro del sistema de clasificación fisiográfica CIAF, con el último escalón de la pirámide, siendo la parte más detallada posible dentro de las geoformas presentes. (Figura 64).



**Figura 64.** Mapa resultante TPI (Ver mapa en Anexo 6).

### **3.2.4.2 Modelo de sombras**

Como base se utilizó el modelo de terreno DTM, el método consiste en utilizar distintos valores de color, que permitan crear los efectos de clarososcuros necesarios para obtener una imagen tridimensional en un soporte bidimensional. El sombreado ha sido utilizado en mapas desde hace mucho tiempo, en éste se tiene una doble intención: por un lado, la representación métrica del terreno y por otro, la obtención de una buena imagen visual del relieve. Es un efecto sencillo combinando los valores de orientación y pendiente en los denominados relieves sombreados. Estos mapas intentan reflejar la topografía del DTM de forma más realista, constituyendo además representaciones muy intuitivas. En base al modelo se procedió a generar un modelo de sombras con el algoritmo del programa ILWIS de Hydro-Processing DEM Visualization, el cual genera un modelo combinado de sombras y dirección de la pendiente, luego de aplicar un filtro que calcula áreas de mayor o menor sombra según la ubicación de la fuente de iluminación sobre el DTM. Este es un producto muy útil a la hora de interpretar las diferentes geofomas del terreno, ya que permite realizar una mejor interpretación mostrando sus formas tridimensionales (Figura 65). Para tratar de disminuir el efecto de sombra sobre el fondo de la interpretación real de las áreas analizadas, se combina con una imagen de aspecto que nos da como resultado la orientación, en la cual se muestra el verdadero direccionamiento de las formas presentes dentro del modelo.

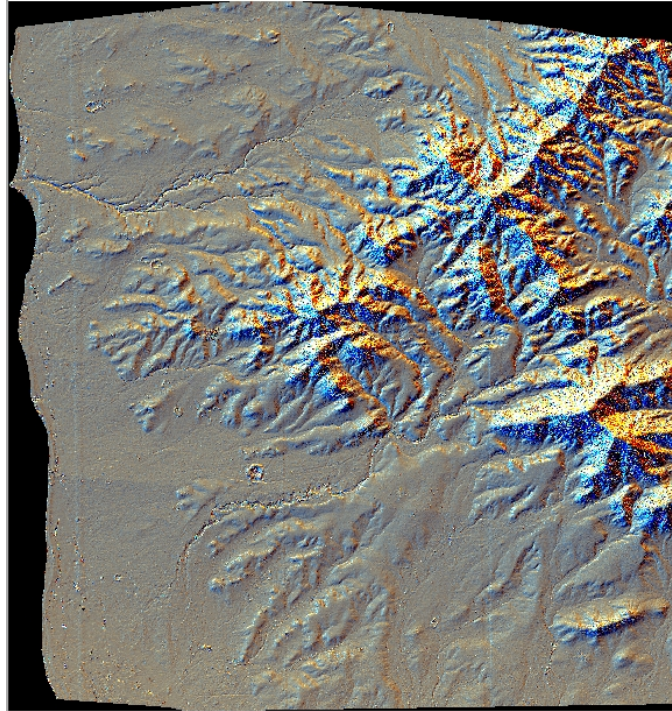


Figura 65. Modelo de sombras combinado con dirección de la pendiente.

### 3.2.4.3 Mapa geomorfológico (Geoformas)

El mapa geomorfológico disponible en la zona de estudio es un mapa 1:100.000 cuadrángulo 6.4 (Figura 66) realizado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) en el año 2007, este tiene un detalle general y no cubre totalmente el área (80%) debido a que solo se limita a la zona costera (Una franja de 2km a partir de la línea de costa) mostrando las unidades geomorfológicas y las facies sedimentarias de una manera general.

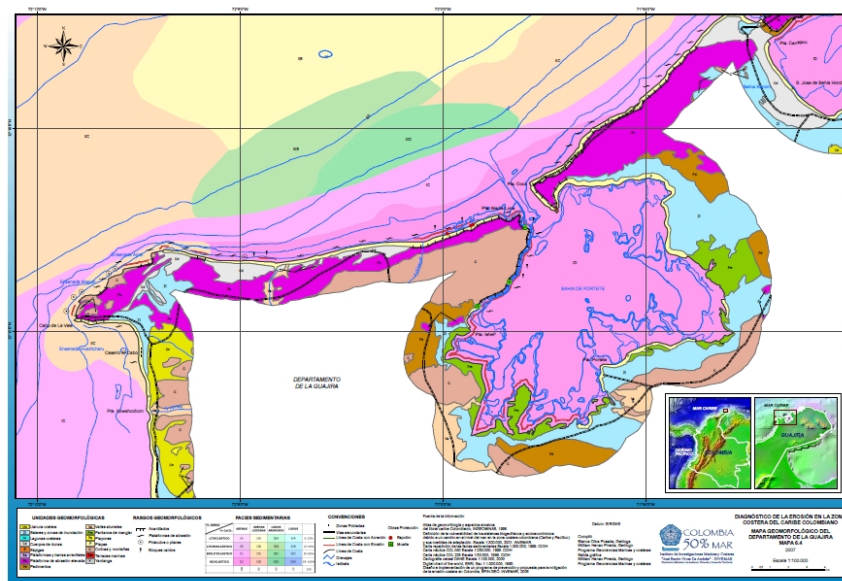




Figura 66. Mapa geomorfológico de Cabo de la Vela 1:100.000 INVEMAR 2007.

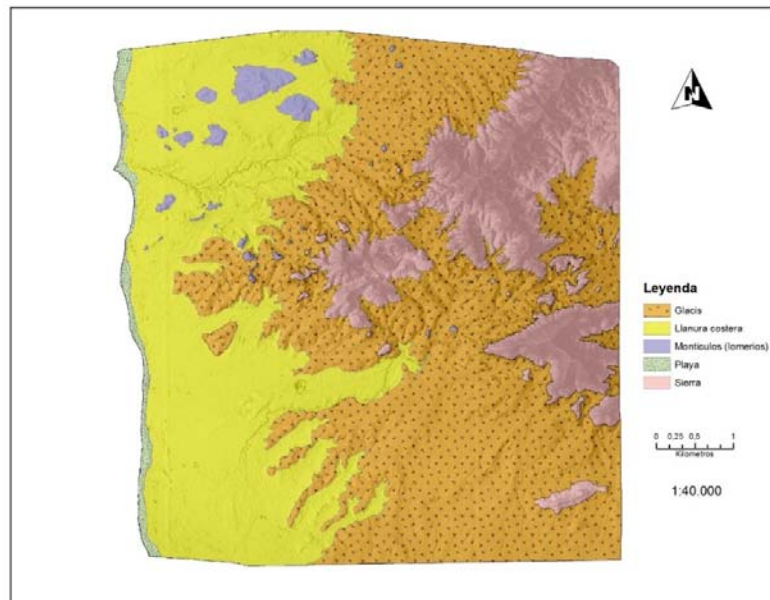
Para la generación de un nuevo mapa, se utilizó una combinación de la información de datos TPI, el modelo de sombras, el mapa geomorfológico 1:100.000 y los datos de campo para trazar un nuevo mapa geomorfológico. Este nuevo mapa consideró la escala de trabajo más detallada 1:10.000 partiendo de los datos del modelo de terreno y la identificación de la geomorfología en el trabajo de campo (Tabla 22)

**Tabla 22.** Clases geomorfológicas identificadas en salida de campo.

<p><b>Llanura costera</b></p> <p>Incluye áreas con una morfología predominantemente plana o de baja altura con respecto al nivel del mar. Su origen es marino o fluviomarino y, generalmente, representa una franja de costa que ha propagado o que es resultado de cambios en el nivel del mar y que se encuentra limitada hacia el continente por colinas o zonas montañosas. (Gómez, 2012).</p>	
<p><b>Sierra</b></p> <p>Es un subconjunto de montañas que está dentro de otro conjunto más grande. Elevaciones estrechas y elongadas de la superficie que conforman series lineales. Presentan cima estrecha y laderas con inclinación pronunciada (Carvajal, 2008). Esta unidad hace referencia a la Serranía de Carpintero.</p>	
<p><b>Playa</b></p> <p>Es un depósito de sedimentos no consolidados que varían entre arena y grava se extiende desde la base de la duna o el límite donde termina la vegetación hasta una profundidad por donde los sedimentos ya no se mueven.</p>	

<p><b>Montículos (Lomeríos)</b></p>	
<p>Formas de relieve con pendiente suave a inclinada y formas redondeadas, producto de una fuerte disección. Las cimas presentan formas desde alargadas a redondeadas (Gómez, 2012).</p>	
<p><b>Glacis</b></p>	
<p>Son superficies de erosión próximas a un plano de longitud moderadamente largo a muy largo, con formas cóncavas y suavemente inclinadas, talladas en roca mecánicamente resistente por procesos de escorrentía o erosión superficial en el pie de una montaña. Los pedimentos son formados bajo condiciones climáticas áridas a semiáridas (Carvajal, 2005).</p>	

En el mapa resultante (Figura 67) muestra las 5 unidades geomorfológicas ajustadas a la propuesta de estandarización de los levantamientos geomorfológicos en la zona costera del Caribe Colombiano creada por Gómez et al en el año 2012, en la cual se normalizan criterios a tener en cuenta en la geomorfología costera del país.



**Figura 67.** Mapa geomorfológico de área de estudio (Ver mapa en Anexo 7).



### 3.2.4.4 Índice de aridez espacial

El índice de Aridez (IA) se utilizó para delimitar las zonas áridas y poder caracterizar la zona de estudio dentro de una clase unidad climática. Se utilizó el Índice de Aridez (IA) de De Martonne ( $IA = 12 * P_i / (t_m_i + 7)$ ). La Precipitación Media Mensual ( $P_i$ ) y la Temperatura Media Mensual ( $t_m_i$ ), provienen de observaciones de 5 estaciones para precipitación y 6 estaciones para la temperatura registradas durante el año 2012 por las estaciones oficiales del IDEAM, se utilizaron estos datos al ser lo más recientes y completos existentes. En muchas regiones del planeta no siempre es posible incorporar factores en el análisis ecológico, debido entre otras causas, a la escasez de estaciones climatológicas, por lo cual es necesario desarrollar procedimientos para extrapolar una pequeña cantidad de datos disponibles a una región completa (Gómez et al, 2008). El IA se calculó mediante la interpolación de las variables ( $P_i$ ) (Figura 68) y ( $t_m_i$ ) (Figura 69) con el método IDW y a una resolución de 50 m.

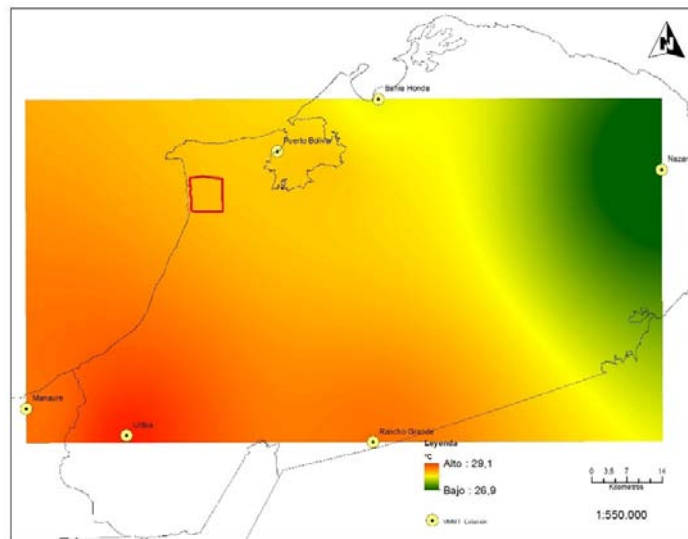


Figura 68. Mapa de La Temperatura Media Mensual 2012.

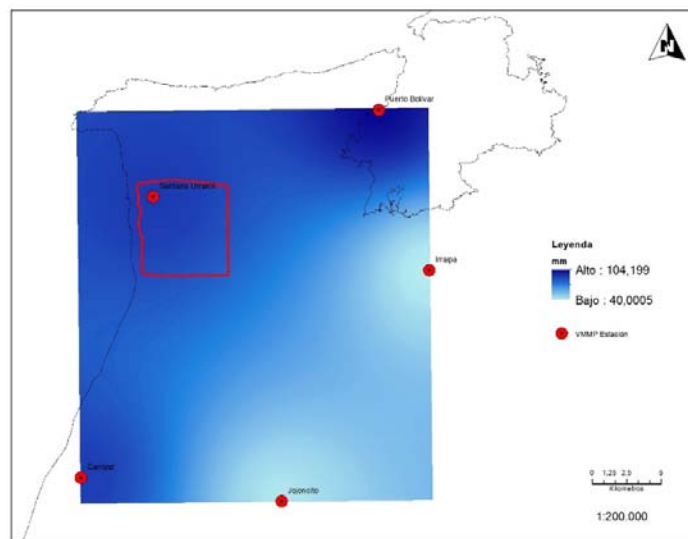


Figura 69. Mapa de La Precipitación Media Mensual 2012.

Mediante álgebra de mapas se obtuvo el IA aplicando la fórmula de acuerdo a De Martonne. Se realizó un corte sobre el área para tener los datos específicos, encontrando que la zona se clasifica como hiperárida (desierto) con valores comprendidos dentro de 2.03 a 2.36 al estar el rango entre 0 y 5 según la clasificación, los mapas arrojaron un error de 3.45 para precipitación y un error de 5.8 para temperatura en su valor RMS (Figura 70).

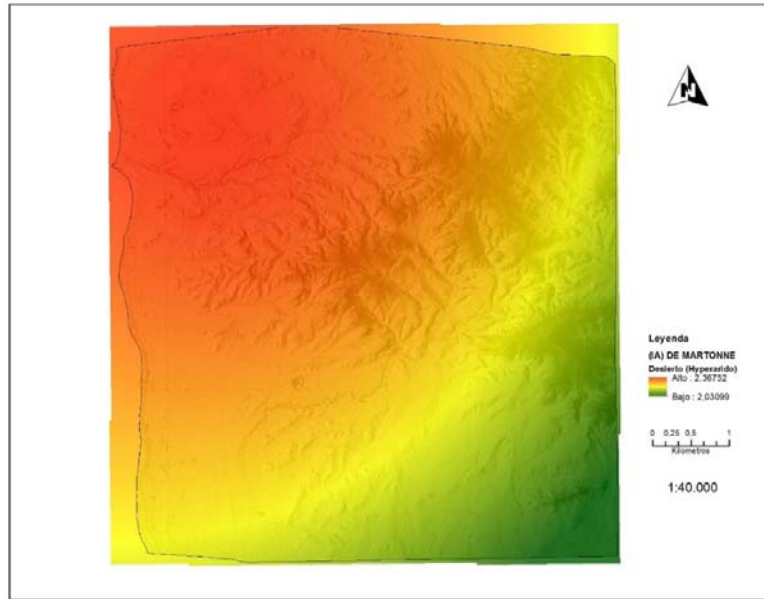


Figura 70. Mapa Índice de aridez De Martonne del área de estudio.

### 3.2.4.5 Mapa de suelos

En el año 2009 se dio a conocer el estudio de suelos departamental a escala 1:100.000 de la Guajira, el mapa resultante de este análisis que engloba el área de trabajo se ubica en la hoja número 5 del índice de mapas (Figura 71).

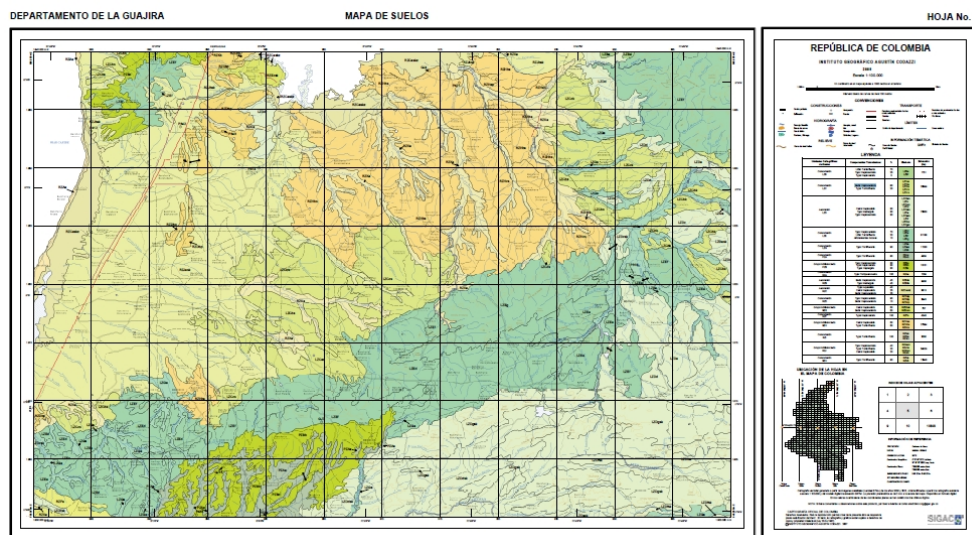
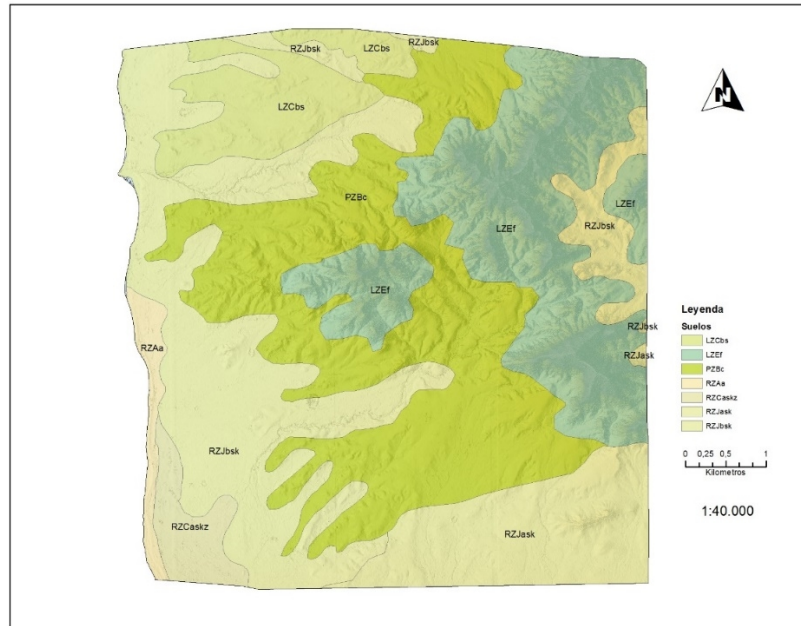


Figura 71. Hoja 5 Mapa de suelos 1:100.000


En el detalle sobre el área de estudio se pueden apreciar alrededor de siete unidades entre consociaciones y grupos indiferenciados de los principales taxones de suelos (Figura 72).








**Figura 72.** Corte del area de estudio sobre la Hoja 5 del mapa de suelos 1:100.000

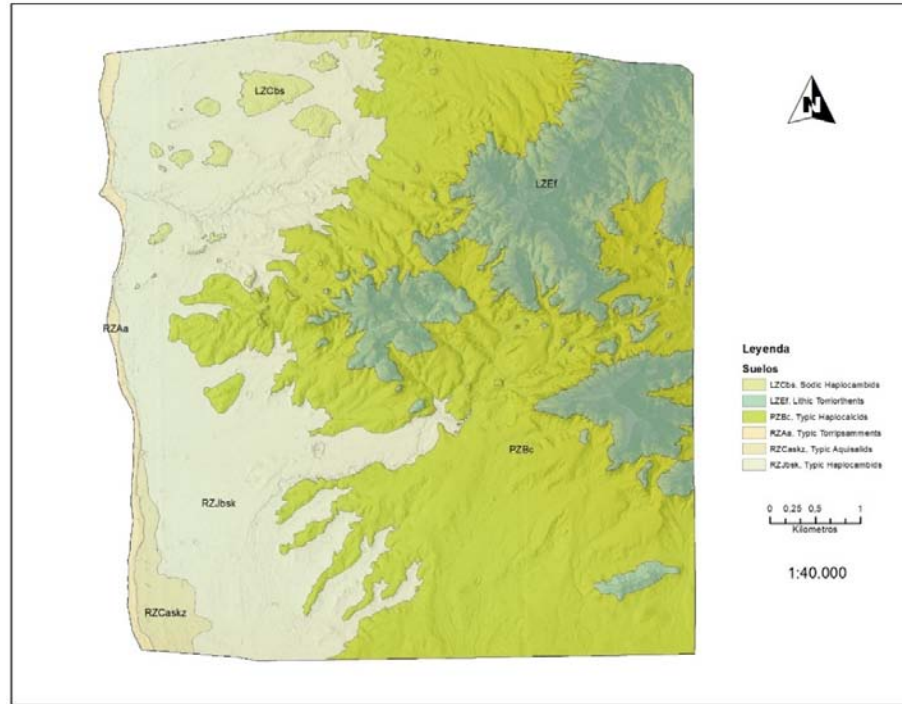
Al realizar una revisión detallada de las unidades de suelos en la zona previa a la salida de campo, se evidenció que la creación de la capa 1:100.000 es fuertemente influenciada por las unidades geomorfológicas. Teniendo en cuenta esto, se trató de correlacionar la geomorfología con los datos generales del mapa de suelos buscando generar una nueva versión del mapa más ajustado a la escala de trabajo. En esta etapa no se planteó realizar calicatas ni perfiles del suelo por las condiciones del área, muchos de los suelos tienen pavimento desértico y otros horizontes endurecidos o cementados por carbonato cálcico muy duro que dificultarían en gran medida las tareas de perfilar el suelo. Se optó solo por revisar las diferentes unidades geomorfológicas y consociaciones de suelos presentes; para ello, se utilizaron las muestras superficiales 10 a 30 cm, el color del suelo (Tabla Munsell), así como, las pruebas de textura de manera manual con el libro de ayudas de inspección visual para taxonomía de suelos USDA (Taxonomy, S, 2014) y la guía de levantamiento de suelos de FAO (Vargas, 2009). Se adjudicaron las clases más evidentes a la geomorfología (Tabla 23) y se generó un nuevo mapa de suelo reclasificado con las observaciones en campo (Figura 73).

**Tabla 23.** Tipos de suelos en relación con la geomorfología local.

Taxonomía	Geoforma	Imagen
Lithic Torriorthents, Afloramientos rocosos	Serranía Estos suelos tienen un contacto lítico que está dentro de los 50 cm de la superficie y por lo general se encuentra a una profundidad de menos de 25 cm.	

Parte III. Marco metodológico

<p>Typic Torripsamments</p>	<p>Playa Los suelos son generalmente de arena y muy susceptibles a la erosión eólica. Se pueden alimentar de duna de arena. Los suelos en el primer plano exhiben poco o ningún desarrollo y apoyan solamente escasa vegetación.</p>	
<p>Typic Haplocalcids</p>	<p>Glacis Es uno de los suelos que tienen o que están recibiendo más carbonatos. El horizonte cálcico contiene comúnmente 40 % o más carbonatos, en particular en materiales parentales calcáreos, pero no se cementa en un horizonte petrocálcico. Estos suelos no tienen un contacto lítico con su límite superior dentro de los 50 cm de la superficie del suelo; tienen un alto potencial de expansión-contracción; la saturación con agua durante 1 mes o más dentro de los 100 cm de la superficie del suelo. Presenta guijarros en su parte superior</p>	
<p>Typic Haplocambids</p>	<p>Llanura costera Son suelos de recientes depósitos o superficies de erosión. No se les permite tener horizontes distintos, a excepción de un horizonte cálcico. Los suelos tienen poca materia orgánica o agua disponible.</p>	
<p>Typic Aquisalids</p>	<p>Salar laguna intermitente Este suelo es típico de los que se encuentran en las lagunas intermitentes costeras que se secan. La corteza blanca en la superficie del suelo es una mezcla de diversas sales solubles. El alto contenido de sal en el perfil superior inhibe el crecimiento de la mayoría de especies de plantas.</p>	
<p>Sodic Haplocambids</p>	<p>Montículos (lomerios) Tiene un horizonte de al menos 25 cm de espesor dentro de los 100 cm de la superficie del suelo, un porcentaje de sodio intercambiable de 15 o más durante al menos 1 mes en el año con presencia de cloruros y nitratos.</p>	



**Figura 73.** Mapa ajustado de suelos (Ver mapa en Anexo 8).

### 3.2.4.6 Geología regional

La Alta Guajira posee rocas que abarcan un amplio rango de edades, desde el Proterozoico hasta el reciente, integrado por litologías metamórficas, ígneas y sedimentarias. Las litologías cristalinas afloran mayoritariamente en las serranías de Simarúa, Carpintero, Jarara y Macuira. A su vez la cobertura sedimentaria está representada por unidades de edad Jurásica y Cretácica aflorantes al norte de Macuira y en la serranía de Cosinas. Esta cobertura también se integra por depósitos de edad Paleógeno y Neógeno aflorantes en todas las planicies bajas y a las faldas de las cinco serranías. Los diversos depósitos cuaternarios (relacionada a zonas costeras y cauces) se encuentran principalmente en la misma posición de las rocas del Paleógeno y Neógeno, y en las zonas de pendientes en las serranías (Zapata 2010). Se revisaron las planchas geológicas 1:100.000 del área de estudio (Figura 74) para poder incluir el atributo geológico dentro de las unidades de paisaje. En esta capa solo se encontraron 4 unidades geológicas, las cuales coincidían con los rasgos geomorfológicos, así que, se incluyeron dentro de la base geomorfológica como un atributo no modificando las unidades sino complementando la información con su origen geológico (Figura 75).

Parte III. Marco metodológico

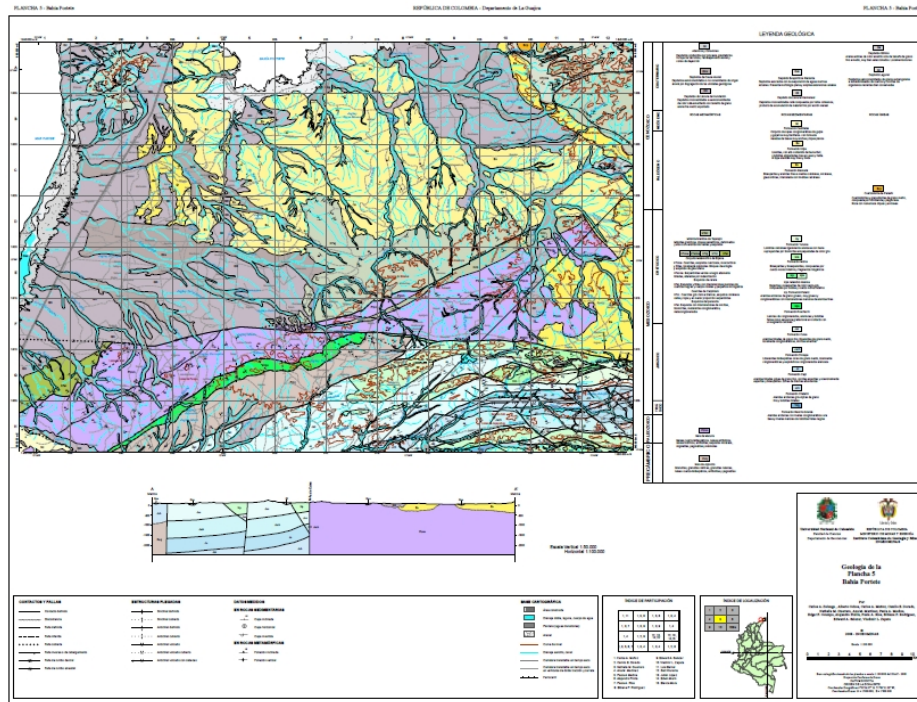


Figura 74. Plancha geológica número 5. 1:100.000 de la Guajira.

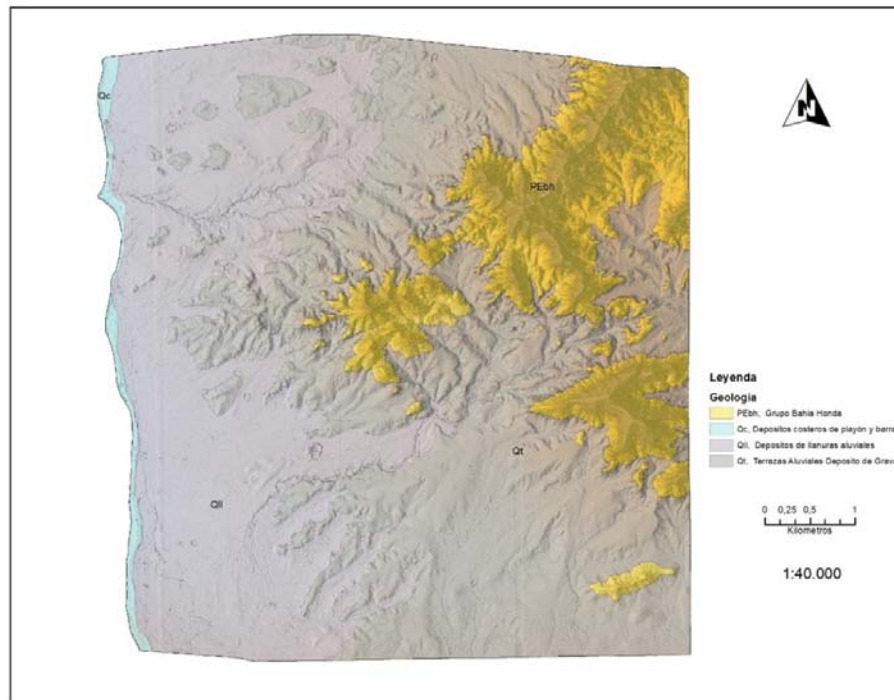


Figura 75. Mapa geológico ajustado para el área de estudio (Ver mapa en Anexo 9).