

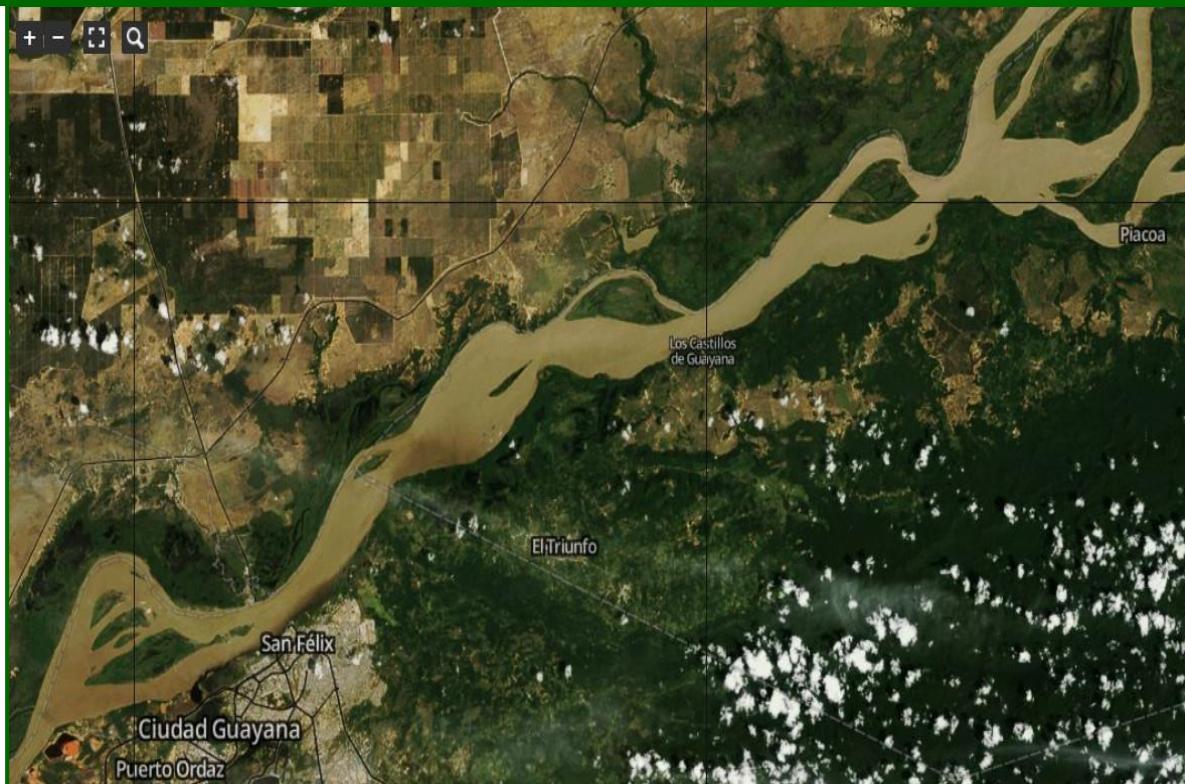
Tesis Doctoral



Universidad de Córdoba

2018

PLANIFICACIÓN FORESTAL Y GESTIÓN TERRITORIAL, MEDIANTE HERRAMIENTAS OPEN SOURCE E IMÁGENES DE SATELITES



Antonio J. Sanhouse G.

**TITULO: *PLANIFICACIÓN FORESTAL Y GESTIÓN TERRITORIAL,
MEDIANTE HERRAMIENTAS OPEN SOURCE E IMÁGENES DE
SATELITES***

AUTOR: *Antonio Jesús Sanhouse García*

© Edita: UCOPress. 2018
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA Y GEOMÁTICA.



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

**PLANIFICACIÓN FORESTAL Y GESTIÓN TERRITORIAL,
MEDIANTE HERRAMIENTAS OPEN SOURCE E
IMÁGENES DE SATELITES**

TESIS DOCTORAL

Memoria presentada por Antonio Jesús Sanhouse García para optar al Título de
Doctor Ingeniero por la Universidad de Córdoba

Dirigida por:

Dr. Alfonso García Ferrer Porras

Dr. Francisco Javier Mesas-Carrascosa

Córdoba - España 2018



TÍTULO DE LA TESIS:

PLANIFICACIÓN FORESTAL Y GESTIÓN TERRITORIAL, MEDIANTE
HERRAMIENTAS OPEN SOURCE E IMÁGENES DE SATELITES

DOCTORANDO/A:

ANTONIO JESÚS SANHOUSE GARCÍA

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

El doctorando ha realizado un buen trabajo, añadiendo a su formación nuevas disciplinas, demostrando capacidad e independencia en el trabajo que se debe requerir a todo egresado con el grado de doctor.

Su trabajo de investigación ha sido sometido a una revisión por pares en una revista científica de alto impacto en el índice JCR.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 23 de Marzo de 2018

Firma del/de los director/es

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Alfonso García-Ferrer".

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Francisco Javier Mesas Carrascosa".

Fdo.: Alfonso García-Ferrer Fdo.: Francisco Javier Mesas Carrascosa

AGRADECIMIENTO

En principio quiero expresar mi entero agradecimiento al gran arquitecto del universo, gracias Dios por haberme otorgado el don de la vida.

Quisiera agradecer y dedicar muy especialmente este trabajo, a mi esposa Dalia Cristina; por su apoyo incondicional durante todo este tiempo, día a día y noche tras noche junto a su ternura y comprensión. A mis hijos; Alvin Antonio y Cristel Montserrat, por estar presentes en mi vida. Os quiero con todo mi corazón. A mi madre, Dellys, que con su apoyo constante logró mantenerme hasta el final de mi trabajo. Gracias madre te quiero un mundo. A mis hermanas y hermanos; Adriana (pape), Alicia, Liliana, Ángela (angí), Alberto, Raúl y Eduardo, por su apoyo perseverante al inicio y durante la consecución de este logro. A mis cuñadas y cuñados, que aun sin estar presentes me han animado a continuar con este trabajo. A mis tíos, tías, primas, primos, sobrinas y sobrinos, gracias por apoyarme durante este recorrido Dios los bendiga. A mi suegra y cuñada; María del Rosario (Sra. chayito) y Marcela; gracias por su ayuda y apoyo que tan amablemente me brindaron en los momentos más difíciles de este camino. Os quiero mucho. Agradeciendo con todo mi corazón a los presentes ya mencionados anteriormente, quisiera mencionar también a todas aquellas personas que desgraciadamente por alguna u otra razón han partido antes que nosotros a la gloria del señor entre ellos familiares y amigos, recordar que aunque no estén físicamente presentes, sus recuerdos siempre estarán en mi corazón.

A todos mis compañeros y amigos del pueblo que me abrigó (Moía), gracias a todos por su ayuda y comprensión recorridos durante este largo baraje. Por compartir agradables y lindos momentos, los cuales tendré siempre presente. También agradecer a aquellos otros amigos de mi linda Venezuela tierra madre, quienes me han dado fuerzas desde muy lejos para continuar. Quisiera poner énfasis en este apartado de agradecimientos a mi gran estimado amigo y su esposa; Sr. Rafael Rodríguez, ahora que Dios lo tenga en su santa gloria y Josefina, quienes con su ayuda inicial son los responsables de la realidad de este

logro, tan importante para mí que les estaré eternamente agradecido. Dios los bendiga.

A la ilustre Universidad de Córdoba (UCO), mi Alma Mater, gracias por acogerme en tu seno durante mi formación y superación profesional.

A los directores de este trabajo y demás colaboradores; Dr. Alfonso García Ferrer Porras, Dr. Francisco Javier Mesas Carrascosa, Dr. Carlos Pacheco, Dra. Blanca Elena Navas, gracias por sus valiosos y sabios consejos aportados para esta Tesis.

Al Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática de la Universidad de Córdoba y su Programa de Doctorado Ingeniería de Plantas Agroindustriales, a su personal académico, gracias por su colaboración.

Al Laboratorio de Procesamiento Avanzado de Imágenes Satelitales (LPAIS) de Venezuela, por tan valioso material proporcionado gratuitamente para esta memoria de Tesis Doctoral. Asimismo, agradezco por la información cartográfica de referencia suministrada de forma gratuita por la Corporación Venezolana de Guayana a través de CVG TecMin.

Por último, quisiera agradecer a todas aquellas personas que no creyeron en que este día llegaría.

A todos, mil gracias...

RESUMEN

Efectuar diagnósticos para la gestión y evaluación de los recursos naturales, requiere del conocimiento de ciertos aspectos como que especies arbóreas están presentes, la edad de la masa forestal, la calidad de sitio así como los tipos de cobertura del suelo. Todos ellos son requisitos esenciales para manejar los recursos naturales, humanos, sociales, económicos y tecnológicos, para una mejor calidad de vida para la población de manera que los patrones de consumo actual no afecten el bienestar de las generaciones futuras.

La clasificación de coberturas del suelo se basa frecuentemente en características distintas entre sus clases, pero con gran homogeneidad dentro de cada una de ellas, obtenidas en principio mediante trabajos de campo y uso de imágenes satelitales interpretadas visualmente en pantalla. El primer caso supone elevados costes económicos y temporales, mientras que en el segundo caso, se han mejorado las técnicas de procesamiento digital de imágenes. Algunos territorios en vías de desarrollo, como por ejemplo los municipios Casacoima y Sotillo en Venezuela, carecen de sistemas de geoinformación de los recursos, debido entre otros aspectos a la falta de información confiable y actualizada de sus recursos, lo cual ocasiona elevados costes, tanto en los trabajos de campo, como, en la adquisición de software de licencia para el procesado de los datos. Actualmente, las alternativas tecnológicas en sistemas de información geográfica y teledetección, constituyen herramientas idóneas para abordar esta tarea. Si bien en una primera instancia este tipo de proyectos suponen elevados costes en adquisición de licencias de software hoy día es posible afrontarlos gracias a herramientas de código abierto u open source.

Este trabajo propone una metodología tecnológica de bajo coste basada en herramientas open source de sistemas de información geográfica para elaborar cartografía temática local de usos de suelo y tipos de cobertura en zonas de escasos recursos a partir de imágenes procedentes del sensor CBERS-2 (Satélite Chino-Brasileño de Recursos Terrestre) e información espacial disponibles en la red. En este sentido, se aplicaron técnicas avanzadas de procesamiento digital de imágenes. Se realizaron diferentes clasificaciones, por el método supervisado a

nivel de pixel y por regiones empleando distintos algoritmos de clasificación y comparándolos entre sí. En el primero de los casos, se ejecutaron los algoritmos de Maxver (máxima probabilidad) y Distancia Euclidea (mínima distancia), mientras que en el método por regiones, se ejecutó el algoritmo Bhattacharya, aplicando la técnica “crecimiento de regiones” en la segmentación. Con este último clasificador, se obtuvieron resultados satisfactorios de fiabilidad global e índice kappa de 83,93% y 0,81% respectivamente. Seguido por el algoritmo Maxver (máxima verosimilitud), con resultados de 73,36% y 0,69% y por último el algoritmo de Distancia Euclidea que devolvió unos valores iguales a 67,17% y 0,61%. La metodología planteada es de gran utilidad en procesos de producción y actualización cartográfica, sirviendo de apoyo para elaborar planes de ordenación y gestión del territorio por parte de quienes intervienen en el proceso de toma de decisiones. Por tanto, las herramientas open source mostraron ser una alternativa económica y técnica viable, no solo para las organizaciones forestales, sino para el público en general, permitiendo desarrollar proyectos en espacios económicamente deprimidos y/o ecológicamente amenazados.

Palabras Claves: Sistema de información geográfica, Software libre, Procesamiento digital de imágenes, Clasificación digital, Ordenación forestal y Gestión territorial.

ABSTRACT

Making diagnoses for the management and evaluation of natural resources, requires knowledge of certain aspects such as tree species are present, the age of the forest, the quality of the site as well as the types of soil cover. All of them are essential requirements to manage natural, human, social, economic and technological resources, for a better quality of life for the population so that current consumption patterns do not affect the welfare of future generations.

The classification of land cover is often based on different characteristics among its classes, but with great homogeneity within each of them, obtained in principle by field work and use of satellite images visually interpreted on screen. The first case involves high economic and temporal costs, while in the second case, digital image processing techniques have been improved. Some developing territories, such as the municipalities of Casacoima and Sotillo in Venezuela, lack geoinformation systems for resources, due, among other aspects, to the lack of reliable and up-to-date information on their resources, which causes high costs, both in the field works, such as, in the acquisition of software of license for the processing of the data. Currently, technological alternatives in geographic information systems (GIS) and remote sensing, are ideal tools to address this task. While in the first instance this type of project involves high costs in software license acquisition nowadays it is possible to face them thanks to open source or open source tools.

This paper proposes a low-cost technological methodology based on open source tools of geographic information systems to develop local thematic cartography of land uses and types of coverage in areas of scarce resources from images from the CBERS-2 sensor (Chinese Satellite -Brazilian Terrestrial Resources) and spatial information available on the network. In this sense, advanced techniques of digital image processing were applied. Different classifications were made, by the supervised method at the pixel level and by regions using different classification algorithms and comparing them with each other. In the first case, the algorithms of Maxver (maximum probability) and Euclidean Distance (minimum distance) were executed, while in the method by regions, the Bhattacharya algorithm was

executed, applying the technique "growth of regions" in the segmentation. With this last classifier, satisfactory results of global reliability and kappa index of 83,93% and 0,81% respectively were obtained. Followed by the Maxver algorithm (maximum likelihood), with results of 73, 36% and 0, 69% and finally the Euclidean Distance algorithm that returned values equal to 67,17% and 0,61%. The proposed methodology is very useful in production processes and cartographic updating, serving as a support to elaborate planning plans and territory management by those involved in the decision making process. Therefore, open source tools proved to be a viable economic and technical alternative, not only for forestry organizations, but for the general public, allowing the development of projects in economically depressed and / or ecologically threatened spaces.

Key words: Geographic information system, free software, digital image processing, digital classification, forest management and territorial management.

INDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA.
AGRADECIMIENTO	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
INDICE DE CONTENIDO.....	VII
SIGLAS Y ACRONIMOS	X
INDICE DE FIGURAS	XIII
INDICE DE TABLAS.....	XV
1 MARCO INTRODUCTORIO.....	4
1.1 INTRODUCCIÓN.....	4
1.2 CONTEXTUALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3 OBJETIVOS	12
1.4 JUSTIFICACIÓN	13
2 MARCO TEORICO: ANTECEDENTES	19
2.1 EVOLUCIÓN DE INTERNET Y LA INFORMÁTICA.....	19
2.1.1 Democratización de las Tecnologías de la Información.	24
2.1.2 Inicio y Desarrollo del Software.....	34
2.2 ORGANISMOS DE ESTANDARIZACIÓN Y/O NORMALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	40
2.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA E INFRAESTRUCTURAS DE DATOS ESPACIALES	47
2.3.1 Infraestructura de Datos Espaciales	58
2.3.1.1 Metadatos.	69
2.3.1.2 Servicios IDE.....	75
2.3.1.2.1 Servicio de catálogo web CSW.....	77
2.3.1.2.2 Servicio de visualización de mapas e imágenes Web, WMS	78
2.3.1.2.3 Servicio de fenómenos o características de entidades web, WFS	80
2.3.1.2.4 Servicio de coberturas web WCS	82
2.3.1.2.5 Servicio de contenidos de mapas web WMC.....	83
2.3.1.2.6 Servicio de nomenclátor, Gazetteer WFSG.	84
2.3.1.2.7 Servicio de descripción de estilos de capa SLD.	84
2.3.1.2.8 Servicio de procesamiento Web, WPS.	85

2.4 SOFTWARE LIBRE SIG APLICADO AL ANÁLISIS DE LOS RECURSOS NATURALES: CASOS DE ESTUDIO	86
3 FUENTES DE DATOS GEOGRAFICOS EN VENEZUELA	94
3.1 MARCO LEGAL	96
3.1.1 <i>Fundamentos de las IDEs Iberoamericanas</i>	97
3.1.2 <i>Situación Actual de la Información Geográfica en Venezuela</i>	101
3.2 MARCO INSTITUCIONAL	102
3.2.1 <i>Entidades Productoras de Información Geográfica en Venezuela</i>	102
3.2.2 <i>Proyecto IDEGeoVen en Venezuela</i>	104
4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	107
4.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA REGIONAL DEL MUNICIPIO CASACOIMA.....	110
4.2 SITUACIÓN GEOGRÁFICA REGIONAL DEL MUNICIPIO SOTILLO	112
5 MATERIALES Y EQUIPOS	116
5.1 MATERIALES UTILIZADOS	116
5.1.1 <i>Cartografía Básica</i>	116
5.1.2 <i>Imágenes de Satélites</i>	118
5.1.3 <i>Herramientas Open Source</i>	119
6 MAPEO DE USO DEL SUELO A PARTIR DE IMÁGENES DE SATELITES APLICANDO DIFERENTES ALGORITMOS DE CLASIFICACION	123
6.1 METODOLOGÍA APLICADA.....	123
6.2 IDENTIFICACIÓN Y RECOPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN ESPACIAL.....	124
6.2.1 <i>Servicios de Mapas Web</i>	125
6.2.2 <i>Cartografía Básica, Mapa de Vegetación y Tipos de Cobertura de Suelo.</i>	127
6.2.3 <i>Imágenes De Satélites CEBRS-2</i>	127
6.3 PREVIO ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN ESPACIAL	127
6.3.1 <i>Tratamiento Previo de la Cartografía Básica</i>	128
6.3.2 <i>Identificación de Categorías/Clases de Cobertura de Suelo</i>	129
6.3.3 <i>Tratamiento previo aplicado a las imágenes de satélites</i>	130
6.4 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	130
6.4.1 <i>Método de Segmentación de Imágenes</i>	135
6.4.2 <i>Identificación y Selección de Áreas de Entrenamiento</i>	136
6.4.3 <i>Fundamentos de los algoritmos de clasificación digital de imágenes</i>	137
6.5 COMPROBACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	141
7 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	146
7.1 PROCESAMIENTO BÁSICO DE LA INFORMACIÓN ESPACIAL	146
7.1.1 <i>Georreferenciación de la Cartografía Básica de Vegetación</i>	146

7.1.2 Georreferenciación de la información satelital	147
7.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS DE IMÁGENES CBERS-2.....	147
7.3 INTEGRACIÓN DE LOS DATOS EN UN SIG LOCAL.....	154
7.3.1 Productos cartográficos: <i>mapa regional del área de trabajo</i>	154
7.3.2 Productos estadísticos.....	155
7.3.3 Otros tipos de Productos: <i>Web Mapping</i>	157
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	159
9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	164

SIGLAS Y ACRONIMOS

A

AEN/CTN: Comité Técnico de la Asociación Española de Normalización.

AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación.

AGPL: Afferro General Public License.

ArcGIS: Geographic Information System (GIS) Software Produced by Esri.

ARPANET: Advanced Research Projects Agency Network.

ASCII: American Standard Code for Information Interchange.

B

BSD: Berkeley Software Distribution.

C

CAD: Computer-Aided Design.

CAST: Academia China de Tecnología Espacial.

CBERS: China-Brazil Earth Resources Satellite.

CEN/TC: Comité Técnico Europeo de Normalización.

CERN: Conseil European pour la Recherche Nucleaire.

CGIS: Canadian Geographic Information System.

CLI: Canadá Land Inventory.

CNTI: Centro Nacional de Tecnologías de la Información.

CP-IDEA: Comité Permanente para las IDE de las Américas.

CSW: Catalogue Web Service.

CVG TecMin: Corporación venezolana de Guayana, Técnica Minera.

D

DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency.

DGN: Contraction of "Design" Microstation Design Files from Bentley.

E

ECW: Enhanced Compression Wavelet.

EPSG: European Petroleum Survey Group.

ESRI: Environmental Systems Research.

Extensible Markup Language.

F

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FGDC: Comité Federal de Datos Geográficos.

FSF: Free Software Foundation.

G

GDAL: Geospatial Data Abstraction Library (raster data).

GML: Geographic Markup Language.

GNSS: Sistemas de Navegación Global por Satélite.

GNU: GNU's Not Unix (GNU no es Unix).

GPL: Licencia Pública General.

GPS: Sistema de Posicionamiento Global.

GRASS: Geographic Resources Analysis Support System.

GSDI: Global Spatial Data Infrastructure.

GUI: Interfaz Gráfica de Usuario.

GvSIG: Sistema de Información Geográfica de la Generalidad de Valencia España.

H

hosts: Sitio de Alojamiento Web.
HTML: HyperText Mark-up Language.
HTTP: HyperText Transfer Protocol.

I

IBM: International Business Machines.
IDE: Infraestructura de Datos Espaciales.
IDEGeoVen: Infraestructura de Datos Espaciales de Venezuela.
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IGDS: Internal Governance Documents System.
IGVS: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.
IMGRID: Interactive Manipulation GRID.
INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IP: Internet Protocol.
IPGH: Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
ISO: Organización Internacional de Normalización.

L

LOPOT: Ley Orgánica para la Planificación y Ordenación del Territorio.

M

MDE: Modelo Digital de Elevación.
MDS: Modelo Digital de Superficie.
MID/MIF: MapInfo Interchange File Format.
MIT: Instituto Tecnológico de Massachusetts.
MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
MPL: Mozilla Public License.

MS-DOS: Microsoft System.

msnm: Metros Sobre el Nivel del Mar.
MySQL: Structured Query Language.

N

NCP: Network Control Protocol.
ND: Niveles Digitales.
NEM: Nucleo Español de Metadatos.
NSDI: National Spatial Data Infrastructure.
NSFNET: National Science Foundation Network.

O

OGC: Open Geospatial Consortium.
OGR: OpenGIS Simple Features reference Implementation Library (vectorial data).
OS: Open Source.

P

PCT: Puntos de Control Terrestre.

Q

QGIS: Quantum Geographic Information System (GIS).

R

RMSE: Root Mean Squared Error.

S

SIG: Sistemas de Información Geográfica.
SL: Software Libre.
SLD: Styled Layer Descriptor.
SO: Sistema Operativo.
Spring: Sistema de Procesamiento de Información Georreferenciada.
SRTM: Shuttle Radar Topographic Mission.
SYMAP: Synteny Mapping and Analysis Program.

T

TCP: Transmisión Control Protocol.

TI: Tecnologías de Información.

TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación.

TIN: Triangular Irregular Network.

U

UML: Lenguaje Unificado de Modelado.

URL: Uniform Resource Locator.

USGS: United States Geological Survey.

UTM: Universal Transversal de Mercator.

W

W3C: World Wide Web Consortium.

WCS: Web Coverage Service.

Web Map Service o Servicio de Mapas Web.

WFS: Web Feature Service.

WFSG: Web Feature Service-Gazetteer.

WGS84: World Geodetic System.

WMS: Web Map Service.

WPS: Web Processing Service.

WWW: World Wide Web.

X

XML: Extensible Markup Lenguaje.

INDICE DE FIGURAS

	PÁGINA.
Figura 1. Acceso a un servicio de catálogo en internet (Fuente: Elaboración propia). .28	
Figura 2. Modelo cliente-servidor (Fuente: elaboración propia).66	
Figura 3. Esquema del servicio de acceso a datos geoespaciales (Fuente; McLeod, 2001).....74	
Figura 4. Acceso a servicios IDE desde un cliente ligero vía Web (Fuente: elaboración propia).....76	
Figura 5. Acceso a servicios IDE desde un cliente pesado, gvSIG (Fuente: elaboración propia).....77	
Figura 6. Interacción básica del usuario y los datos espaciales (Fuente: Nebert, 2001).78	
Figura 7. Consulta WMS, Getmap y su resultado (Fuente. Elaboración Propia).....79	
Figura 8. Consulta WMS, GetFeatureInfo y su resultado (Fuente. Elaboración Propia).80	
Figura 9. Consulta sobre la publicación del servicio WFS (Fuente. Elaboración Propia).81	
Figura 10. Consulta WFS en Software libre QGIS como cliente. Capa de la zona de peligro de riesgo de incendio de Málaga, España (Fuente. Elaboración Propia)82	
Figura 11. Consulta al servicio de cobertura WCS con el cliente QGIS. Capa de Modelo Meteorológico de Prealerta de la Provincia de Andalucía (Fuente. Elaboración Propia).83	
Figura 12. Delimitación conjunta de la zona de estudio108	
Figura 13. Situación Relativa Nacional del estado Delta Amacuro109	
Figura 14. Situación Relativa Nacional del estado Monagas.110	
Figura 15. Situación geográfica regional de Casacoima111	
Figura 16. Situación geográfica regional de Sotillo113	
Figura 17. Cartografía Básica de Vegetación (Municipio Casacoima).....117	
Figura 18. Cartografía Básica de Tipos de Suelo (Municipio Casacoima).117	
Figura 19. Cartografía Básica de Tipo de Usos (Municipio Sotillo).118	
Figura 20. Esquema metodológico (Fuente: Elaboración propia).123	
Figura 21. Geo-portal Nacional Simón Bolívar, Visualizador Geográfico SIGIZC (Fuente: elaboración propia).125	

Figura 22. Identificación del Área de Estudio, gvSIG Cliente WMS (Fuente: elaboración propia).....	126
Figura 23. Información vía WMS de las entidades gráficas (Fuente: elaboración propia).....	126
Figura 24. Cartografía Básica Georreferenciada (Fuente: elaboración propia).	129
Figura 25. Firmas espectrales tipo de algunos elementos habituales (Fuente: Olaya, 2014).....	132
Figura 26. Algoritmo de clasificación No supervisado ISOSEG. (Fuente: Olaya, 2014).	135
Figura 27. Algoritmo de clasificacion supervisada Bhattachary (Fuente: Cámara, et al., 1996).....	138
Figura 28. Algoritmo de clasificación supervisada de Máxima probabilidad (Fuente: Cámara, et al., 1996).....	139
Figura 29. Algoritmo de clasificación supervisada de Mínima distancia (Fuente: Cámara, et al., 1996).....	141
Figura 30. Precisión del usuario y Productor del mapa.....	153
Figura 31. Clasificación por los algoritmos de: a. Bhattacharya, b. Maxver (máxima verosimilitud) y c. Distancia Euclidea (mínima distancia).....	154
Figura 32. Producción Cartográfica: Mapa temático (elaboración propia).....	155
Figura 33. Superficies Clasificadas por los algoritmos Bhattacharya, Maxver y Dist. Euclidea.	157

INDICE DE TABLAS

	PÁGINA.
Tabla 1. Formatos de archivos de entrada compatibles con modelos de software libre	55
Tabla 2. Resumen de características de imágenes CBERS – 2	118
Tabla 3. Características de las bandas espectrales del sensor CBER-2	119
Tabla 4. Coordenadas y RMSE registradas durante la georreferenciación.....	147
Tabla 5. Matriz de confusión obtenida con el algoritmo de clasificación Bhattacharya.	149
Tabla 6. Matriz de confusión obtenida con el algoritmo de clasificación Maxver (Máxima verosimilitud).	150
Tabla 7. Matriz de confusión obtenida con el algoritmo de clasificación Mínima Distancia (Distancia Euclídea).	150
Tabla 8. Resumen de fiabilidad global e índice kappa de los distintos operadores de clasificación.....	151
Tabla 9. Clasificación de áreas (ha), realizado por los distintos algoritmos de clasificación.....	156

I. MARCO INTRODUCTORIO

1 MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Introducción

Los problemas ambientales causados por la conjunción de múltiples factores como son el aumento demográfico, la expansión de la frontera agrícola y el crecimiento urbano e industrial entre otros, hacen necesario establecer un adecuado plan de ordenación territorial bajo el principio de desarrollo sustentable que disminuyan los posibles impactos sobre los recursos naturales, sin poner en riesgo la permanencia del hombre sobre la tierra (Briceño, M. 2005 Román y Cuesta, 2016). El sector forestal es uno de los más amenazados por las actividades antrópicas. Por cuanto para el beneficio del hombre, en él se realizan actividades de aprovechamiento y explotación en algunos casos sin manejar el recurso de acuerdo al principio del desarrollo sostenible, con lo cual se estaría garantizando la permanencia de los recursos en el tiempo y el de las generaciones futuras.

La administración de los recursos naturales es uno de los grandes retos que tienen las regiones en vías de desarrollo. La localización y disponibilidad geográfica de algunas regiones, la falta de recursos alternativos a la agricultura, la alta concentración de predios o la falta de información geográfica son causas que propician el deterioro ambiental y frenan toda posibilidad de desarrollo (Roa, 2010). En este sentido, la Dirección de Ordenación del Territorio, adscrita a la Dirección General de Planificación y Ordenación del Ambiente de Venezuela, estableció la Ley de Reforma Parcial de la Ley Orgánica para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio (Gaceta Oficial N° 5820, 2006), para actualizar los planes estatales, acorde con lo dispuesto en el artículo 8 de la Ley orgánica para la planificación y ordenación del territorio (LOPOT), de “Contribuir a la optimización de la generación y equitativa distribución de la riqueza que beneficie prioritariamente a los sectores y regiones económicamente más deprimidos, considerando todos los ámbitos y particularidades de nuestra diversidad geográfica”.

La planificación y gestión de los recursos naturales para la ordenación territorial comprende entre otros aspectos de un estudio de caracterización de suelo. Esto supone administrar, analizar y tratar grandes volúmenes de información espacial. Motivo por el cual, el uso y manejo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), resulta esencial para esta tarea, gracias a su capacidad de almacenar y procesar el conjunto de datos, siendo cada vez más popular y común su uso (Bosque, *et al.*, 1988, Lillesand *et al.*, 2015).

La información o conjunto de datos que alimentan a estos sistemas provienen de fuentes de datos primarias o secundarias. En el primer caso la información es recopilada en campo mediante mediciones directas. En el segundo caso la información proviene de documentación, mapas, fotografías aéreas, imágenes de radar e imágenes de satélite entre otros, tratadas a través del procesamiento digital de imágenes como pueden ser los métodos supervisado o semi-supervisados de clasificación entre otros (Monjardin. *et al.*, 2016, Pérez-Ortiz. *et al.*, 2015). Estos métodos supervisados para clasificar los píxeles de la imagen, se basan en la respuesta de las distintas firmas espectrales obtenidas de la cobertura terrestre, influenciada a su vez por el conjunto de bandas y la capacidad de la aplicación para discriminar entre una y otra firma espectral Kiptala. *et al.*, (2013), a través de algoritmos matemáticos, los cuales mediante pasos sucesivos permiten al software realizar cierta actividad. En este caso, el algoritmo de máxima verosimilitud, también conocido como máxima probabilidad, y el algoritmo de mínima distancia son los más comúnmente utilizados, siendo este último uno de los métodos más antiguos (Del Toro. *et al.*, 2015).

La clasificación digital de imágenes requiere de metodologías que sean operativas, interpretables, transparentes y susceptibles de tener un alto grado de automatización. En la cartografía de cobertura de suelos, a partir de datos de teledetección, se han usado distintas metodologías, destacando las de tipo paramétrico como el algoritmo de máxima probabilidad (Del Toro. *et al.*, 2015). Debido a la alta disponibilidad de datos, consecuencia del elevado desarrollo tecnológico, estas técnicas de clasificación han surgido como alternativas exactas y eficientes en comparación a técnicas clásicas de fotointerpretación

en la cartografía de cobertura de suelo (Vorovencii y Muntean, 2013). Las metodologías del tipo paramétrico, han impulsado la necesidad de adoptar una nueva generación de herramientas y técnicas alternativas, las cuales tienen su centro en la automatización de procesos.

Una metodología operativa y transparente para analizar la información digital, se puede abordar empleando aplicaciones de hardware y software SIG basadas en soluciones libres (Bonet, *et al.*, 2014, Mesas-Carrascosa. *et al.*, 2016). Estas herramientas se conciben como un elemento integrador que engloba un conjunto de componentes interrelacionados de hardware y software (Olaya, 2014). Además, ofrecen una mejora en la economía del proyecto respecto a soluciones propietarias con carácter privativo. Importantes casas comerciales desarrollan complejos algoritmos y procesos, optimizando los recursos físicos de hardware en el manejo de grandes volúmenes de datos. Sin embargo, éstos procesos están ligados con elevados costes económicos en la adquisición de licencias de software, limitando su uso y afectando a la investigación científica (Guillén, *et al.*, 2006).

Por otra parte, las iniciativas basadas en soluciones Open Source (OS) software constituyen una alternativa económica viable y sostenible a nivel local, regional y nacional. Estas presentan importantes ventajas respecto a las casas comerciales privativas, entre ellas destacan una mayor interoperabilidad, libre competencia así como la posibilidad de poder trabajar en mutua colaboración entre usuarios y desarrolladores en todo el mundo.

Las licencias de este tipo software se clasifican atendiendo al grado de acceso y uso entre otros tipos en GPL (Licencia Pública General), AGPL (Licencia Pública General de Affero), MPL (Mozilla Public License) (Guerra, 2013). En este sentido, el software licenciado bajo esta modalidad hace necesario ceder cuatro libertades a los usuarios del software, recogidas en la filosofía de la fundación para el software libre “Free Software Foundation”, en particular: la libertad de usar el programa con cualquier propósito, la libertad de estudiar cómo funciona el programa y adaptarlo a sus necesidades, la libertad de distribuir copias y, la libertad de mejorar el programa y hacer públicas las

mejoras de modo que toda la comunidad se beneficie de éstas (Barahona, *et al.*, 2005). De todas estas libertades es la disponibilidad del código fuente la de mayor importancia, permitiendo automatizar e industrializar procesos (Stallman, 2004).

Una de las condiciones más importantes de las iniciativas basadas en soluciones libres es el software, el cual juega un papel clave para facilitar la interoperabilidad. Según Bueno (2008) una de las definiciones de interoperabilidad más citadas es la propuesta por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) de 1990, el cual la define como “la habilidad de más de dos sistemas para intercambiar y usar la información entre ellos, de manera uniforme y eficiente”. En este sentido, la Open Geospatial Consortium (OGC) promueve el desarrollo de programas de código abierto que permitan manejar formatos de datos abiertos, lo que hace posible que sean interoperables entre diferentes sistemas y aplicaciones (OGC, 2014).

Para lograr una mayor interoperabilidad es necesario trabajar en un marco común de estándares, los cuales garantizan el acceso a largo plazo a los datos almacenados por el sistema. A nivel de procesado de información destaca librerías como Geospatial Data Abstraction Library / Simple Features reference (GDAL/OGR) empleada por numerosas soluciones SIG por ser una biblioteca que da acceso a una gran variedad de formatos de datos espaciales (GDAL, 2015). GDAL/OGR es una librería multiplataforma con licencia X/MIT.

Este otro tipo de licencia se usa para la distribución del sistema X Windows permisiva que permite la redistribución, uso y modificación prácticamente sin restricciones (Barahona, *et al.*, 2005). Ofrece una herramienta de línea de comando para convertir y procesar un amplio rango de formatos de datos geoespaciales, tanto vectoriales como raster. Entre los formatos soportados más populares de tipo raster destacan GeoTIFF, Erdas Imagine, ESRI Grids, ECW, MrSID; mientras que para los de tipo vectorial aparecen MapInfo (tab y MID/MIF), ESRI Shapefile, ESRI Coverages, ESRI Personal Geodatabase, DGN , PostGIS, Oracle Spatial, entre otros. Esto hace que GDAL sea el motor primario de acceso a los datos de muchas aplicaciones tales como: MapServer,

GRASS, QGIS, y OpenEV. También es utilizado por OSSIM, Cadcorp SIS, FME, Google Earth, VTP, Thuban, ILWIS, MapGuide y ArcGIS (GDAL, 2015).

Actualmente se han desarrollado estudios orientados a la gestión y evaluación medioambiental empleando herramientas OS SIG tales como Spring, GRASS, GvSIG, Saga, Kosmo QGIS, GeoServer, MapServer, PostGIS, MySQL, OpenLayers, TerraAmazon (Altobelli, *et al.*, 2010, Ortiz, 2011, Monjardin. *et al.*, 2016).

En este contexto, los trabajos realizados a partir de estas herramientas generalmente son publicados en la red mediante servicios de catálogos considerando las especificaciones del Open Geoespatial Consortium (OGC) mediante los servicios de una infraestructura de datos espaciales (IDE), siendo unas de sus ventajas el acceso inmediato a un conjunto de datos actualizados y fiables. Estos servicios pueden ser basados en fenómenos, coberturas, raster o de catálogo.

Los servicios basados en fenómenos o servicio WFS (Web Feature Service) se tiene la posibilidad de proporcionar interfaces necesarias para publicar, acceder, consultar y descargar información de interés en formato vectorial (geometrías y atributos), es decir, gestiona entidades espaciales discretas (Vretanos, 2010). En el caso de los servicios basados en coberturas o WCS (Web Coverage Service) se ofrecen las herramientas para la gestión de entidades continuas o coberturas, es decir, representa los fenómenos geográficos en un contexto espacio-temporal continuo, ofreciendo una serie de atributos comunes a todas las posiciones del espacio, de modo que sea posible publicar y acceder al conjunto de datos en formato raster, malla y a series temporales (Whiteside y Greenwood 2010). El servicio WMS (Web Map Service) ofrece la posibilidad de visualizar información geográfica e imágenes mediante los formatos de soporte GDAL/OGR, además es capaz de gestionar los distintos sistemas de referencia espacial (EPSG) y aunque no es posible la descarga, permite visualizarlos y definir el modo en que se representa a través de su simbología y estilos (GDAL, 2011 y OGP-EPSG, 2011). Por último, el servicio CSW (Catalogue Web Service) tiene por objeto principal permitir que

los usuarios puedan localizar datos y servicios geográficos, empleando cualquiera de las operaciones que describen su interfaz, a través de la consulta de metadatos (GetRecords) y la selección de metadatos (GetRecordsByld) (Nebert, *et al.*, 2007, y Bernabé-Poveda, y López-Vázquez, 2012).

En definitiva, todos estos servicios proporcionan productos muy útiles para el usuario final bien sea público o privado, contribuyendo y asistiendo a los procesos de toma de decisiones (Kelly, *et al.*, 2013), desarrollando nuevas aplicaciones y mejorando el conocimiento sobre el medio entre otros. Estos servicios WEB incluyen en tiempo real la descarga y análisis de la información, como el desarrollado por el programa MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) del USGS (Science for a Changing World) o el proyecto CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite), todos ellos con objeto de fomentar la investigación e impulsar el desarrollo (García y Pérez, 2014). Así pues, se oferta una gran cantidad de información de libre acceso con una amplia variedad de resolución espacial, temporal y espectral, permitiendo un amplio abanico de posibilidades en su uso. Por tanto, a partir de la combinación de técnicas de teledetección, SIG y análisis estadístico es posible generar entre otras aplicaciones cartografía temática de usos de suelo y tipos de cobertura (Clemente, *et al.*, 2006, López y Plata, 2009, Portilla. *et al.*, 2014).

El presente estudio propone una metodología innovadora de bajo costo que permita generar cartografía temática de uso de suelo y tipos de cobertura, a partir de imágenes de satélites y herramientas SIG basada en código abierto, a fin de contar con un sistema de información para la planificación y gestión del territorio cuando no se cuente con suficientes recursos económicos. El análisis de la información incluye diferentes algoritmos de clasificación, se archivan en una matriz de almacenamiento de datos y posteriormente se construyen modelos integradores sobre el uso del suelo y sus tipos de cobertura. Mediante la automatización también se identifican los aspectos cualitativos y cuantitativos de las clases determinadas, así como el nivel de detalle espacio-temporal requerido para su evaluación (Larocque, *et al.*, 2014).

En la gestión territorial, es necesario disponer de inventarios de recursos naturales para precisar su valor social, económico y ecológico dentro de los espacios geográficos, ya no como una potencialidad explotable, sino como una posibilidad de Gestión Territorial. Es importante mantener una adecuada planificación y gestión territorial para garantizar no solo el buen aprovechamiento de los recursos naturales, sino también la disponibilidad y conservación en el tiempo para las futuras generaciones.

El uso de las tecnologías libres de información, como el software de gestión, no sólo es de carácter personal, nivel usuario, sino también es empleado a nivel empresarial en procesos de producción cartográfica y proyectos SIG, siendo estas organizaciones quienes tienen una mayor responsabilidad de fomentar y promover su uso, de modo que se pueda fijar en las soluciones libres una alternativa económica viable que contribuya a la mejora y fortalecimiento de la economía de la región, a través de programas y proyectos de desarrollo, lo cual sería difícil alcanzar empleando soluciones privativas.

1.2 Contextualización y delimitación del problema

Frente a la oferta de la gama en software propietario o comercial privativo se está posicionando y cobrando cada vez con más fuerza el “Software Libre” u “Open Source (OS)”. En el caso concreto de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) esto representa una alternativa interesante debido especialmente al ahorro en el coste económico de obtención de licencias de explotación y uso de soluciones privadas. Por tanto, las soluciones basadas en alternativas libres ofrecen un marco de trabajo accesible tanto a nivel usuario como profesional para organizaciones, administraciones entre otros, permitiendo llevar a cabo distintos proyectos de investigación y desarrollo para la generación de conocimiento.

Las herramientas de software libre permiten a los usuarios la posibilidad de desarrollar proyectos, con una inversión económica casi nula en cuanto al software de gestión. Sin embargo, algunas de estas herramientas tienen ciertas limitaciones en cuanto a funcionalidades, las cuales no siempre llegan al nivel del software más especializado (Culebro, et al., 2006). Por otro lado, al ser

programas de código fuente abierto, estos pueden ser adaptados a las necesidades particulares de cualquier usuario permitiendo implementar sus propias funcionalidades para el desarrollo de sus soluciones.

Uno de los aspectos más característicos del software libre es la naturaleza colaborativa entre comunidades de usuarios, lo que implica redes de desarrolladores trabajando desde distintas localizaciones, compartiendo código fuente para la mejora del software y el desarrollo de nuevas versiones. Esta supone una dinámica distinta al modelo de desarrollo tradicional que se ha venido aplicando en el desarrollo de software basado en el mantenimiento en el control sobre el código fuente oculto, ejerciendo la explotación permanente del derecho de autor. Por ello y como alternativa para la independencia tecnológica, surge el movimiento del software libre, el cual es una consecuencia de la necesidad de establecer nuevos modelos de cambio dentro de la industria del software (Stallman, 2004).

Al igual que sucede en otras áreas de conocimiento, la Ingeniería Forestal, y en particular los aspectos relativos de gestión forestal y ordenación de masas arbóreas, deben sacar partido de las numerosas capacidades y ventajas ofrecidas por las nuevas tecnologías libres para la consecución de los objetivos propuestos que satisfagan en principio las necesidades de la sociedad, permitiendo alcanzar una mejora en la calidad de vida y bienestar social. El manejo de los recursos naturales es uno de los principales problemas a los que se enfrentan actualmente muchos de los países en vías de desarrollo, como es el caso de la República Bolivariana de Venezuela, donde el importante crecimiento demográfico, la pobreza estructural, la debilidad de sectores alternativos a la agricultura, la alta concentración de la propiedad de la tierra, el nivel tecnológico y la inexistencia tanto de información de los recursos naturales como de un plan de vigilancia y control de sus áreas, son algunas de las diversas causas que propician el deterioro ambiental y frenan toda posibilidad de desarrollo para un modelo sostenible.

Estos problemas, causados por múltiples factores, hacen necesario desarrollar un adecuado plan de ordenación territorial, empleando las actuales tecnologías

basadas en soluciones libres y datos geoespaciales de forma gratuita. Como resultado es posible generar información actualizada de la zona geográfica de interés, la cual es posible procesarla mediante estas herramientas, permitiendo realizar evaluaciones de impacto ambiental originados por la acción del hombre. Igualmente importante es la continuidad en el tiempo del mantenimiento de estos proyectos, permitiendo realizar estudios multitemporales. Suponiendo un marco de trabajo de especial interés en países en vías de desarrollo proporcionando rapidez y precisión en los estudios ambientales, una mayor interoperabilidad entre sistemas de información, al tiempo que una reducción de costes económicos a lo largo de la vida del proyecto. Bajo este escenario de trabajo se facilita la elaboración de proyectos en espacios económicamente deprimidos y/o ecológicamente amenazados que contribuyan al proceso de toma de decisiones por parte de los distintos entes involucrados.

En este contexto, la presente Tesis Doctoral plantea como hipótesis de partida la viabilidad técnica de la utilización de información geoespacial accesible por el público en general y herramientas OS como instrumentos para una correcta planificación y gestión forestal, de apoyo al proceso de ordenamiento del territorio.

Los resultados obtenidos con las herramientas OS presentaran suficiente exactitud para cumplir con los objetivos básicos de planificación y gestión forestal.

Con el desarrollo metodológico planteado y herramientas OS, ha resultado necesario contemplar el uso de software comercial privativo en la presente investigación.

1.3 Objetivos

Desarrollar un entorno de trabajo que, con un reducido coste económico, permita crear y desarrollar un SIG con objeto de contar con una herramienta de planificación y gestión del territorio en el ámbito forestal de cara a apoyar los planes estratégicos de ordenación territorial.

Como objetivos específicos se establecen:

1. Utilizar información geográfica de acceso libre, o de reducido coste económico, y herramientas OS en la planificación y gestión forestal.
2. Analizar la calidad de los resultados obtenidos para su uso en la planificación y gestión forestal.
3. Contrastar los resultados obtenidos con un software SIG comercial privativo.
4. Evaluar las funcionalidades y las ventajas que ofrece una herramienta SIG OS desarrollada bajo estándares libres.
5. Analizar los aspectos relativos a la caracterización de usos de suelo, a fin de optimizar una equitativa distribución de los recursos que beneficie prioritariamente a los sectores y regiones económicamente más desasistidos del estado.

Por tal motivo se pretende dar a conocer hasta qué punto se puede desarrollar un proyecto SIG, empleando a su vez imágenes de Satélites e información espacial libre y disponible en la Red.

1.4 Justificación

Las soluciones OS han entrado a formar parte de las herramientas usuales del manejo de información geoespacial para la gestión y consulta de información, a través de los servidores de mapas y servicios basados en SIG disponibles en la red. Estos sistemas, aportan un gran número de funciones básicas y generales, permitiendo la posibilidad de personalización y adaptación a necesidades particulares de distintos perfiles de usuarios. En este sentido, es posible encontrar una gran variedad de soluciones SIG desarrolladas en un contexto de OS aplicados al análisis de los recursos naturales, catastro o cualquier otro proyecto donde se requiera el manejo de la componente geoespacial.

Un SIG aplicado a los recursos forestales, constituye una herramienta idónea para la planificación y gestión forestal, capaz de aumentar la capacidad técnica

de organizaciones forestales, universidades, empresas e instituciones del estado. Para aprovechar ese potencial, los entes privados y demás instituciones deben estar dispuestos a dedicar recursos tanto económicos como humanos a fin de brindar soluciones a los problemas medioambientales. Si alguno de estos actores no dispone de información geoespacial con una adecuada calidad espacial y temporal, no estará en condiciones de adoptar decisiones estratégicas y eficaces de planificación: siendo esencial en el proceso de toma de decisiones contar con información espacial actualizada sobre los recursos naturales, el estado en que se encuentran y su evolución en el tiempo.

El objetivo en los procesos de planificación territorial es responder y dar soluciones a una gran gama de preguntas y problemas, dentro de los cuales destacan la definición del tipo de operaciones a emprender durante el periodo de planificación y donde se realizaran. No obstante, responder y brindar soluciones adecuadas requiere de conocer los recursos disponibles, el estado en que éstos se encuentran así como su magnitud y distribución geográfica. Las soluciones en muchos casos son provisionales debido a que factores imprevisibles como catástrofes naturales pueden obligar a introducir cambios decisivos en un determinado plan de manejo. Sin embargo, esto no supone poner en duda la importancia de la calidad del plan de manejo, sino que al contrario, resalta la importancia en el uso de estas tecnologías y técnicas en la prevención de estas catástrofes.

Dentro de estas técnicas, se encuentran el uso de herramientas geomáticas basadas en licencias OS las cuales facilitan su aplicación en la gestión territorial. Esto significa que cualquier usuario tiene acceso para su utilización, lo cual no implica que sea totalmente libre, definiendo por tanto distintos tipos de licencias (Stallman, 2004). Entre las más usuales del software libre se encuentran la licencia publica general (General Public License, GPL-GNU) en la cual el desarrollador conserva los derechos de autor, permite su libre distribución, modificación y uso, bajo las condiciones que definen al software libre, lo que significa que las versiones modificadas heredarán las mismas obligaciones y derechos del programa original, por tanto el código fuente debe

estar disponible y accesible en todo momento. Un ejemplo de ello es el software SagCAD, QGIS, entre muchos otros. Por otro lado destaca la modalidad de licencia AGPL (Affero General Public License), ésta se enmarca dentro del grupo de licencias GNU, la cual obliga a que se distribuya el software que se destine a dar servicios a través de una red de ordenadores, es decir, si es usado como parte parcial para la creación de un nuevo software, éste quedaría sujeto a su libre distribución (Stallman, 2004). La licencia BSD (Berkeley Software Distribution) es un tipo de licencia permisiva la cual cede el uso del programa bajo las condiciones que definen al software libre, pero en este caso no obliga necesariamente a hacer públicas las mejoras que se realicen sobre el código, por ejemplo el sistema operativo OpenBSD (Culebro, *et al.*, 2006).

La importancia de este tipo de herramientas como alternativa para el análisis espacial queda establecido en las ventajas y/o beneficios que aportan al usuario final y dentro de las cuales destaca la creación de un entorno de libre competencia, beneficiando a empresas y usuarios. Además, dado su carácter libre, los usuarios influyen en el proceso de evolución detectando y/o corrigiendo errores e introduciendo nuevas funcionalidades o mejorando las ya existentes, permitiendo compartir conocimientos de forma que los desarrolladores puedan continuar con nuevas actualizaciones. Un ejemplo de ello son las actualizaciones periódicas de librerías GNU/GPL como open 3D, Graphics cpp, etc., frente a soluciones comerciales privativas, las cuales presentan una mayor cadencia en cuanto a nuevas actualizaciones.

Las soluciones OS por su carácter abierto, permiten un mejor mantenimiento del sistema y dificultan la introducción de códigos maliciosos, debido al proceso de revisión pública y auditorías a que está sometido constantemente el software, lo que aporta un gran dinamismo al proceso de corrección para futuras versiones (Arriola, *et al.*, 2011). Todas estas ventajas se han de tener en cuenta antes de decidir qué tipo de software, libre o privativo, usar para desarrollar un determinado sistema de información.

El software libre actualmente ha pasado a formar parte de la administración pública de algunos gobiernos, ya que a nivel de transparencia permite auditar sus efectos y funciones en los procesos administrativos y evitar puertas ocultas impuestas sin conocimiento del gobierno, por terceros. El Estado debe usar estándares de datos e información, garantizando la sustentabilidad de la información pública a su cargo. En este sentido, los gobiernos deben tomar decisiones adecuadas para mejorar las condiciones de la sociedad, con lo cual el uso de tecnologías libres de la información favorecerá la democratización en el acceso a la información y a sus sistemas, facilitando la interoperabilidad entre los mismos. Muchos de los países en vías de desarrollo están actualizando sus sistemas a las nuevas tecnologías libres de información. En este contexto, la República Bolivariana de Venezuela, a través del Decreto Nº 3.390 (Gaceta Oficial Nº 38.095, 2004), establece:

“Que la adopción del Software Libre desarrollado con Estándares Abiertos en la Administración Pública y en los servicios públicos facilitará la interoperabilidad de los sistemas de información del Estado, contribuyendo a dar respuestas rápidas y oportunas a los ciudadanos, mejorando la gobernabilidad”.

En Venezuela, el Centro Nacional de Tecnologías de la Información (CNTI) en colaboración con el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) son los entes encargados para llevar a cabo el proyecto de actualización del sistema administrativo del Estado a sistemas desarrollado con estándares abiertos (proyecto de migración de datos a sistemas abiertos), en cumplimiento de sus funciones de aplicar el decreto. Proyecto desarrollado conjuntamente con la asociación gvSIG (<http://www.gvsig.com>) para la promoción de la geomática libre y el desarrollo del software gvSIG (González. et al., 2010). Como parte del proyecto, la infraestructura de datos espaciales de Venezuela IDEGeoVen (http://www.geoportalsb.gob.ve/geoportal_sitio/) tiene como objetivo desarrollar un SIG comunal piloto para definir los procedimientos y tecnologías de apoyo a fin de aplicar de forma normalizada en cualquier área desfavorecida dichos procedimientos (Pinto, 2009).

La gestión del territorio por medio del ordenamiento territorial es una política que se remonta a antiguas prácticas de ejecución en Venezuela, manifestando incoherencias que se reflejan en notorias contradicciones entre los instrumentos de implementación y los resultados obtenidos. Estos hechos ocasionan problemas que actualmente aquejan el proceso de planificación dentro de la gestión territorial (Salas, 2011). Por tanto, se pretende con las alternativas tecnológicas impulsar nuevos modelos de cambio donde exista una intervención pública adecuadamente estructurada y orientada sobre el territorio venezolano a fin de reducir los efectos que tendrán estos procesos sobre los componentes sociales, económicos y ambientales, que en la mayoría de los casos están vinculados a la degradación de recursos naturales, crecimiento anárquico de asentamientos humano y ocupación de áreas con alto riesgo natural, entre otros. Por ello, el presente estudio busca sistematizar algunos aspectos ambientales involucrados en esta temática, de manera que sea posible actualizar la información existente y fortalecer el análisis el proceso de planificación territorial para la toma de decisiones a niveles estatales, favoreciendo con ello a otros niveles locales.

II. DESARROLLO DEL MARCO TEORICO



2 MARCO TEORICO: ANTECEDENTES

2.1 Evolución de Internet y la Informática

Internet es, como tantas otras tecnologías innovadoras, un desarrollo militar que nació del interés del ejército estadounidense en los años sesenta por lograr comunicaciones fiables y descentralizadas. Roberts en 1965, según Leiner, et al., (2006), da un paso fundamental y “hace dialogar a los ordenadores entre sí”, para lo cual conectó un ordenador TX2 en Massachusetts con un Q-32 en California a través de una línea telefónica commutada de baja velocidad, creando así la primera y reducida red de ordenadores de área amplia jamás construida. Un año más tarde, Roberts se incorpora a DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) para desarrollar el concepto de una amplia Red que llamará ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network), la cual fue utilizada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) como medio de comunicación para las diferentes instituciones académica y estatales.

En el año 1969, DARPA y Rand Corporation desarrollan una forma de enviar y recibir información basada en paquetes commutados. Sin embargo, en Julio de 1961, Leonard Kleinrock, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), ya había publicado el primer artículo sobre commutación de paquetes, técnica base de Internet. Leonard y Roberts, vieron la factibilidad teórica de usar las comunicaciones vía paquetes en lugar de circuitos, lo cual fue un avance hacia el trabajo informático en red (Cervera, 2005).

La commutación de mensajes para la comunicación, consiste en una especie de central telefónica para la commutación y control de grandes cantidades de datos procedentes de diferentes fuentes. Un computador puede ser utilizado para registrar gran número de datos digitales de diversos puntos de procedencia, clasificarlos y transmitirlos por diferentes conductos, utilizando los circuitos de commutación. Internet es considerada una red, por ello las redes en los sistemas de cómputo son organizados y siguen una ruta crítica para realizar acciones (Clark, 1980). De acuerdo a ello, todas las redes siguen procesos

lógicos secuenciales, que se asemejan a los procesos de un diagrama de flujo con entradas y salidas.

Simultáneamente, mientras ARPANET desarrollaba el proceso para la transferencia de información utilizando la conmutación de paquetes, se fue desarrollando la tecnología que hizo posible reglamentar la red en cuanto a la circulación, selección y destino de la información para garantizar la trasmisión de la misma. A esta tecnología de ordenamiento se le llamó Protocolo, creado en 1972 por Ray Tomlinson junto al correo electrónico (Aroche, 2007). Con los protocolos básicos del correo electrónico o e-mail, se crea la convención de la arroba para separar el nombre de una persona o lugar del identificador del servidor a fin evitar confusión entre los dos segmentos o partes de la estructura de una dirección electrónica, la del remitente y la del destinatario (Feixa. et al., 2016, Bates, 2016). Rápidamente fue considerado al correo electrónico como una de las aplicaciones estrella al permitir comunicaciones entre personas. Siendo uno de los más grandes servicios competitivos para empresas como Yahoo, Hotmail y Google, principales proveedores de servicios que ofrecen cuentas de correo gratuitas. Los protocolos además de sentar las bases del flujo de información, permitían además la integración de otras subredes, ayudando a hacer posible la comunicación a través de la red (Wyatt. A, 1997).

Kahn y Cerf (2007) desarrollan en 1973 la primera versión de los protocolos TCP/IP (Transmisión Control Protocol / Internet Protocol), lenguaje básico que permite el funcionamiento de Internet. Estos protocolos actúan como un conjunto de reglas que permiten a diferentes ordenadores intercambiar información, incluso sobre líneas de comunicación poco fiables. Permiten también establecer la conexión con Internet, red de redes, no solo por su capacidad de interconexión, sino por su estandarización de lenguajes, lo cual posibilita que todas las redes puedan intercambiar información (Basch, 2000).

El nuevo método de comunicación e intercambio, se expandió rápidamente por las redes y en 1983, los protocolos TCP/IP fueron los únicos protocolos aprobados por ARPANET, sustituyendo al protocolo anterior NCP (Network Control Protocol), de uso compartido de archivos que controlaba las

comunicaciones entre diferentes fuentes (Postel, 1981). Siendo una de sus principales ventajas el poderse conectar con diferentes computadoras (hardware) y programas (software). ARPANET se convirtió en el núcleo de internet, y en una herramienta primaria para el desarrollo tecnológico, contribuyendo de esta forma con la democratización de la información.

A principio de 1980, nacieron redes privadas y públicas. Sin embargo, un hecho importante fue la aparición de los ordenadores personales, lanzando al mercado la empresa IBM su primer PC con el sistema operativo de la firma Microsoft. La compañía MS-DOS de William H. Gates y Paul Allen, según Comín (2003), establece un acuerdo de contrato firmado con IBM, lo que le permite a Microsoft vender su sistema operativo a otras compañías. En 1984 Microsoft había otorgado licencias de MS-DOS a 200 fabricantes de equipos informáticos, lo que convierte al sistema operativo como el más utilizado para PC, promoviendo asimismo un primer acercamiento al permitir el intercambio y la consulta de información. Posteriormente, en el año 1985 los fundadores de Microsoft lanzan la primera versión del sistema operativo Windows. Dos años más tarde, en 1987, sale a la venta Windows 2.0 con un nuevo aspecto visual y mejora del rendimiento de la versión anterior. Seguidamente surgen las versiones Windows 3.0, 3.1 y 3.11. Estas versiones, que ya venían preinstaladas en la mayoría de los equipos, se convirtieron rápidamente en los sistemas operativos más utilizados de todo el mundo (Comín, 2003).

El objetivo básico de la invención de la computadora u ordenador fue el de crear una máquina capaz de procesar de forma rápida y eficiente gran volumen de información, aspecto de gran utilidad sobre todo para la toma de decisiones. Estas computadoras fueron interconectadas para compartir información, utilizando para ello una computadora central como administradora de la comunicación denominada servidor o server y al resto de las computadoras conectadas se les identificaba con el nombre de terminales, considerando esta integración como una red (NET). En los ochenta, Internet se separa de ARPANET para dar entrada a la National Science Foundation Network (NSFNET) dentro un ambiente científico y académico, con lo cual cada centro universitario establece una conexión con el servidor (Ferguson, 1996).

Tim Berners-Lee es el primero en desarrollar e implementar la red basada en el concepto de hipertexto en 1991 con objeto de poder compartir información sobre su investigación. Tim Berners-Lee puso a disposición su implementación para el uso público, asegurando de esta forma que la tecnología se extendería, abriendo paso al software Gopher, una interfaz de hipertexto comúnmente utilizada en internet. Posteriormente, la World Wide Web (WWW), habría sido probada por primera vez en Marzo de 1989 por Tim Berners-Lee (Ruiz y Pérez, 2007) en el CERN (Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire en francés), ahora denominado Laboratorio Europeo para la Física de Partículas. Con la aparición de la WWW, nace en el año 1993, el software Mosaic un navegador con una amigable interfaz gráfica, creado por Marc Andreesen sobre un fondo gris, con documentos gráficos y enlaces en azul.

El objetivo de la WWW fue inicialmente facilitar a un grupo de investigadores el acceso a la información existente en los computadores del centro a fin de poder publicar sus trabajos sobre distintos temas con referencia directa a las fuentes originales. Esto logró sustituir los pies de página y referencias bibliográficas por referencias de tipo hipertexto, que al seleccionarlas llevarían a través de enlaces al documento original. Esta situación permitió incluir el lenguaje HTML (HyperText Mark-up Language) y el protocolo HTTP (HyperText Transfer Protocol), para la Transferencia de HiperTexto. Con el paso del tiempo la red aumenta el número de usuarios considerablemente y por el momento cuenta con dos millones de ordenadores conectados, de los cuales, 10.000 de ellos lo hacen bajo la extensión “.es”.

El doctor Víctor Rojas Amandi, citado por Peña (2001), establece que internet es un sistema maestro de diversas redes de computadoras que a través de protocolos comunes permiten la comunicación y el intercambio de información y servicio por medio de enlaces conectados nacional e internacionalmente. Con estos avances tecnológicos en 1995 se abre camino el comercio electrónico en Internet, el cual fue experimentando un constante crecimiento. Por tanto, Internet pasa a convertirse en una auténtica precursora de la gestión en línea por donde se transmiten un gran volumen de información, constituyendo una de las mejores vías para la comercialización, el acceso a la información comercial,

el intercambio por medios electrónicos y digitales de bienes y servicios, el suministro de contenidos digitales y las transferencias electrónicas de fondos entre otros (Guisado. 2004).

En este orden de ideas, Marc Andreessen en 1994 funda el navegador de Internet Netscape junto a Jim Clarke de la empresa Silicon Valley, y en 1995 sale a cotizar en bolsa, tal aspecto marcaría el comienzo del boom de Internet. En ese mismo periodo, Microsoft lanza con gran publicidad el sistema operativo Windows 95 diseñado hacia la nueva era de Internet. Un año más tarde en 1996, según establece Comín (2001), el 98% de usuarios emplean el navegador Netscape para ese periodo. Por su parte, la compañía Microsoft lanza el navegador Explorer, dando inicio a una gran competitividad y disponibilidad de navegadores. En 1998, Microsoft con la mayoría de navegadores, hace sentir la publicidad “online” y el pago por click, hechos que generaron la burbuja de “.com”, con 17 compañías bajo dicha extensión. En 1999, la red dispone de más de 300 millones de páginas. Posteriormente con el desarrollo tecnológico de Google se iniciaría el registro del dominio comercial.

Las compañías telefónicas empiezan a ofrecer servicios de ADSL en el año 2000. Los operadores de cable comienzan a dar servicio de banda ancha doméstica y para ese momento la web supera los 1.000 millones de páginas. Más tarde, en el año 2003, con los adelantos tecnológicos de la red se desarrolla el sistema WiFi como una alternativa de acceso inalámbrico sin cable a la red (Cervera, 2005).

Internet desde sus inicios ha sido una tecnología de libre acceso, lo cual se atribuye este hecho al rápido crecimiento de la red, ya que permite el acceso a documentos básicos, especialmente a las especificaciones de los protocolos y estándares. Por ello, la Red se incrementa y pasa a más de 300 millones de “hosts”, casi 60 millones de dominios activos, más de 4.000 millones de páginas web indexadas por Google y más de 800 millones de navegantes.

Con la popularización de internet red de redes, con la telefonía móvil, la gran gama de navegadores existentes, el intercambio de información, la invención del correo electrónico y el nuevo sistema de comercio electrónico, se produce

un mayor acercamiento entre los sistemas informáticos, la información y la red. La manipulación de la información, a través de ordenadores, ha producido un gran cambio, la irrupción de la sociedad de la información constituye una revolución cultural, económica y social sin precedentes, que ha impactado a todos los niveles y sectores de la sociedad, con lo cual ante esta ocurrencia, la informática se descentraliza, democratiza y se hace instrumento de funciones múltiples y variadas (Reyes, 2000).

2.1.1 Democratización de las Tecnologías de la Información.

Dentro de este contexto, con la democratización de los sistemas informáticos e Internet, la cartografía no está ajena a utilizar las ventajas que brinda el desarrollo tecnológico de Internet. El entorno Web se ha convertido en el mayor medio para la distribución de información geográfica así como para presentar y comercializar datos espaciales georreferenciados (Van Elzakker, 2000). Frecuentemente se observan sitios de cartografía interactiva y SIG de acceso público, lo que ha hecho posible que más de 40 millones de mapas Web se utilicen al día en todo el mundo (Gutiérrez, 2004).

En los tiempos de la cartografía tradicional, la recopilación y distribución de información geográfica solía estar altamente centralizada y controlada por los gobiernos (Nebert, 2004). De modo, a inicios de la era de Internet en el año 1993, la información fluía en una dirección, de lo más alto a lo más bajo, es decir, de los altos niveles de la administración pública y la sociedad hacia las medianas y pequeñas empresas del estado así como a niveles particulares de clase baja, donde los usuarios ejercían el rol de consumidores pasivos. Con la llegada de la web 2.0, esas posibles diferencias entre productores de información y consumidores se ha difuminado, de forma que cualquier usuario puede contribuir con la generación de información geográfica, compartiendo contenidos en Internet que para otras personas puede ser de interés, lo cual cambia sustancialmente la filosofía de flujo de la información de abajo a lo más alto, es decir, de los niveles de clase baja en la sociedad hacia los niveles de clase media alta, incluyendo a las medianas y pequeñas empresas y se materializa por lo que hoy día conocemos como redes sociales, blogs, wikis,

comentarios a páginas, videos, YouTube, periodismo y canales de comunicación entre otros, aportando distintas representaciones de la realidad (Budhathoki *et al.*, 2008). Una característica común en la producción de información se ha venido a llamar el “contenido generado por usuarios” (*user generated content*). En este sentido, Goodchild (2007) acota el término “información geográfica voluntaria” (*volunteered geographic information*, VGI) para hacer referencia a dicho contenido generado por los usuarios.

Con los avances de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), Internet, los SIG y la telefonía móvil, la información geográfica ha ido evolucionando y democratizándose. En este sentido, Internet, como uno de los principales actores de esta democratización, cuenta hoy día con usuarios en todo el mundo; así lo evidencian países como Asia con 46,7% de usuarios, Europa con 77,4%, Latinoamérica y el Caribe con 42,4%, África con el 31,2%, Norte América con el 89,1% entre otros (Internet world stats - www.internetworldstats.com/stats.html).

La democratización de la cartografía, consiste básicamente en el impacto social que ha generado el conjunto de avances tecnológicos ocurridos en estas últimas tres décadas, haciendo llegar la información cartográfica a cualquier usuario mediante aplicaciones fáciles de usar y de interfaz sencilla, hasta convertir dicha información en presentaciones de mapas más familiares para la mayoría de la población (Rodríguez *et al.*, 2009). En el año 2005, con la aparición de los globos digitales con representaciones on-line de mapas 2D y 3D como Google Earth o Microsoft Virtual Earth, Google Maps, Yahoo Maps, Bing Maps u OpenStreetMap, la información geográfica rápidamente se convirtió en un “telón de fondo” geográfico permitiendo a los usuarios compartir contenido con algún componente espacial. Sin embargo, este conjunto de desarrollos tecnológicos apoyados en otras herramientas como, los teléfonos celulares, las Tablet, los vehículos equipados con GPS, acelerómetros y cámaras entre otros, han potenciado el concepto inicial de la web a geoweb, la cual contribuye con la democratización de los datos (Mateos, 2013).

Estos instrumentos colaboran activamente con la recolección de información y por supuesto, con su disponibilidad a través de la web, favoreciendo la conexión y la accesibilidad, requisitos en los cuales se basa el intercambio de información. Considerando en el proceso de recolección de datos los estándares, como un componente más de gran impacto ya que desde su aparición han supervisado los procesos de transmisión y flujo de datos.

Desde el origen de la cartografía analógica y su posterior transición hacia un contexto completamente digital, así como el origen de los SIG en los años 60, la información geográfica y las herramientas de visualización o geovisualización han sido partícipes en el desarrollo de muchos países debido a las ventajas que ofrece su utilidad e implementación ya que “están presentes en todas las etapas de resolución de problemas en el análisis geográfico, desde el desarrollo de las hipótesis iniciales, hasta el descubrimiento de conocimiento, análisis, presentación y evaluación” (Buckley *et al.*, 2000).

En la geovisualización, además de considerar las representaciones espaciales de información cuantitativa a través de mapas temáticos, físicos y/o topográficos, también se incluye información de tipo alfanumérica no cartográfica, pero con componentes espaciales como diagramas de redes, gráficos estadísticos, etc., así como del material cualitativo que provee de significados al espacio como la fotografía, video, texto o audio con referencia explícita a su componente espacial. Por ello, a través de estos recursos la democratización de los datos se vincula con las actividades de la comunidad de usuarios en forma directa, permitiendo la transferencia de conocimiento a todos los niveles de la sociedad, favoreciendo el desarrollo tecnológico de cara a afrontar los grandes retos que conlleva una gestión sostenible dentro del plan de ordenamiento territorial. De ahí la importancia del manejo especializado en la tecnología SIG, la cual permite a los gobiernos, instituciones y empresas planificar, ejecutar y gestionar políticas de sostenibilidad.

Blake, *et al.* (2001) establecen que la información geográfica en la red funciona adecuadamente siempre y cuando los usuarios traten la información con un software de gestión especializado, semejante al software que la generó. Siendo

estos en la mayoría de los casos software comercial. A consecuencia de esto, a través del OpenGIS Consortium (OGC) se fomenta una solución no propietaria de acceso a la información geográfica en la red basada en el concepto de interoperabilidad. Las especificaciones del OGC permiten la visualización y el intercambio de información espacial georreferenciada entre los diversos sistemas de software, independientemente de que éste sea propietario o no. De éste modo, se trabaja sobre vistas o sobre los datos directamente provenientes de fuentes diversas.

La publicación de cartografía en Web permite la localización y visualización de información espacial de los distintos servicios de catálogo, empleando lo que se conoce como una dirección URL (Uniform Resource Locator). La actividad para la identificación y catalogación de la información geográfica se basa en inventariar, organizar y clasificar los datos geográficos presentes en cualquier repositorio, permitiendo definir a cada uno de estos sus atributos, sus relaciones y sus respectivas operaciones con el fin de que puedan ser entendidos y utilizados por diferentes usuarios. Un servicio de catálogo como CSW contiene información proveniente de un servicio construido bajo estándares de comunicación interoperables OGC, el cual transmite un conjunto de peticiones entre el cliente y el servidor devolviendo como respuesta los metadatos del conjunto de datos, ya que accede a todos los registro de metadatos de forma remota. El servicio de catálogo es de gran importancia ya que permite acceder y consultar a través de él información de todos los recursos geográficos disponibles.

La Figura 1 muestra el escenario donde diversos clientes, organización A, B, C y D, acceden a un catálogo de datos para localizar aquellos servicios y datos cartográficos, posteriormente el servicio envía la respuesta de cada petición a cada cliente, ofreciendo los metadatos que cumplen con los parámetros de búsqueda de cada uno de ellos. Posteriormente, cada cliente podrá acceder mediante un servicios Web como por ejemplo WMS a los datos, permitiendo visualizar información geográfica bien desde un navegador web o cliente ligero, o bien, mediante un cliente pesado como una aplicación SIG de escritorio. En este caso Internet se ha convertido en una excelente herramienta de acceso y

alojamiento de datos, ofreciendo información geográfica proveniente de diversas fuentes.



Figura 1. Acceso a un servicio de catálogo en internet (Fuente: Elaboración propia).

Los mapas web además de representar las relaciones espaciales entre fenómenos, pueden funcionar como interfaces para información adicional. Se pueden utilizar para evaluar visualmente la orientación de un vuelo fotogramétrico para la adquisición de productos como fotografías aéreas. Alternativamente, permiten que el usuario defina el contenido del mapa web por medio de activación y/o desactivación de capas. Además, es posible desplegar procesos dinámicos a través de animaciones (Gutiérrez, 2004). Cada mapa es una vista del territorio que afecta a la manera en que pensamos sobre el mundo, y la manera en que pensamos sobre como nuestro ambiente influencia la forma en que actuamos dentro de él.

En este contexto, la información debe estar disponible para ser compartida con la misma eficacia y precisión con la que sale de su origen, ya que el aumento demográfico de la población afecta los recursos naturales y modifica su entorno constantemente, lo que hace requerir de información actualizada que pueda ser transmitida eficazmente para el planeamiento y desarrollo económico de una región (Anguix, 2005). En este sentido, la independencia tecnológica es fundamental para poner en marcha soluciones basadas en diversas tecnologías de la información y telecomunicación con la finalidad de aprender a

conectar lo global con las realidades locales. La localización de lo global no es asunto esencialmente geográfico, es primeramente social. La información accesible globalmente, tiene que ser organizada en un contexto estatal, regional o local, donde cobre significado para lograr los objetivos propuestos en la planeación (Pisani, 2005).

No obstante, cada vez es mayor la disponibilidad y diversidad de medios tecnológicos para la captura y adquisición de información geográfica bien en forma raster mediante sensores ópticos trabajando en modo RGB, multiespectrales y/o hiperespectral a partir de sensores embarcados en satélites o aeronaves, o bien en formato vectoriales a partir de Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) o por restitución fotogramétrica. Estos sistemas permiten generar / obtener información geográfica con elevados niveles de precisión y actualización a costes cada vez menores, generando un crecimiento sin precedentes en la cantidad de información disponible (Echeverria, 2001).

La información geográfica a la que se alude en esta Tesis Doctoral, normalmente engloba a entidades del terreno como ríos, vialidad, lugares entre otros, imágenes con paisajes como: ciudades, zonas rurales y áreas completamente naturales, campos, volcanes, montañas, playas, desiertos, selvas y por supuesto, todas ellas con una perspectiva espacial. Esta idea y consideración de las ciencias geográficas años atrás era relativamente pobre considerando la cantidad de actividades y herramientas dirigidas a obtener información. Hoy día, con el crecimiento de Internet, y en particular con las tecnologías basadas en la Web, el acceso a la información ha llegado a ser una operación accionada por la demanda, es decir, los consumidores esperan un fácil acceso y una rápida localización a los datos, tanto de acceso libre como de pago. Dado su carácter científico y el conocimiento geográfico de muchos años, la información geográfica ha ido evolucionando y democratizando su uso, tomando como herramientas de apoyo los adelantos tecnológicos de la informática, mostrándose en una nueva y renovada faceta denominada Geomática (Nieves, 2008).

El término geomática o ciencia de la información geográfica apareció por primera vez en Canadá en 1970 acuñado por el francés Bernad Dubuisson, según el autor Pagiatakis, citado por Tapia-Silva (2014). Otro autor como Gomarasca (2010), indica que el término fue publicado en 1981, por Michel Paradis en la revista “Le Géomètre Canadien” en Canadá. La geomática como disciplina, está compuesta por la palabra geo, “Tierra”, y “mática” de “informática”, considerando en este último caso el gran potencial de cómputo y sus avances tecnológicos. Hoy día, la geomática también conocida como información espacial, información geoespacial e incluso tecnología geoespacial, es entendida como la ciencia que se encarga de gestionar gran cantidad de información geográfica mediante la utilización de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), permitiendo la integración de manera sistemática de procesos, técnicas y acciones. Asimismo, estudia una serie de métodos para la adquisición, modelado, tratamiento, almacenamiento, recuperación, análisis, explotación, representación y difusión de la geodesia, la cual recoge disciplinas como la fotogrametría, topografía, la teledetección, sistemas de información geográfica e infraestructura de datos espaciales entre otros. Es decir, está involucrada con ciertas ciencias que suponen el procesamiento de información geográfica georreferenciada (Castro, 2011).

La referencia espacial de datos geográficos contempla el uso de una amplia variedad de tecnologías como los sistemas de posicionamiento global por satélite, sensores remotos y técnicas tradicionales de medición y descripción de terrenos. Por otro lado, el procesado y explotación de la información geográfica queda cubierto por el desarrollo de tecnologías como los sistemas de información geográfica, incluyendo tanto aspectos de hardware y software como las aplicaciones de gestión (Nieves, 2008).

Lo que comenzó siendo un avance instrumental para acelerar y ampliar los campos del conocimiento ha dado lugar a que la informática se haya convertido en una disciplina de gran importancia en la actualidad, ya que sienta las bases para nuevas disciplinas. La geomática como nueva disciplina científica, en la que confluyen la información, la cartografía y geodesia tradicional, comprende un amplio rango de disciplinas que al unirse presenta una visión detallada y

comprendible del mundo real, determinando la forma en que el hombre se mueve sobre el territorio (Icaza, 2012).

La Geomática, con esta visión más detallada de las peculiaridades del entorno físico gracias a los avances informáticos y a su carácter espacial e integrador, que incluye en su ámbito a la cartografía digital, la percepción remota, los sistemas de información geográfica (SIG), la fotogrametría, la geodesia y los sistemas GNSS, permite generar información de detalle del territorio, orientada a brindar soluciones integrales que demanda la sociedad, iguales que las que generalmente se abordan desde un marco teórico-metodológico asociado con el análisis espacial (Levi, 2006).

El papel de la geomática dentro del proceso de generación y uso de información referenciada es de gran importancia por cuanto su relación con demás ciencias básicas como la cartografía y la geografía, además de la informática. La cartografía proporciona los mecanismos y técnicas adecuadas para georreferenciar y representar los elementos, objetos y demás variables ubicadas en los espacios físicos de la superficie terrestre.

La cartografía automatizada como parte del proceso en la elaboración de mapas es de especial interés hoy día ya que comprende todos aquellos procesos que con ayuda de los medios electrónicos como las computadoras inciden sobre la generación de bases de datos alfanuméricas organizadas espacialmente. La automatización en cartografía, además de facilitar diversos procesos de presentación, participa en los procesos de cálculos a los que están sometidas constantemente las bases de datos digitalizadas. Cálculos métricos, geométricos o estadísticos de información geoespacial o incluso no espaciales introducidos en cada objeto cartográfico (Herrera, 2001).

La informática, que engloba el flujo de la información en su relación espacio-temporal, está actualmente representada por los modernos sistemas de telecomunicación satelital y las redes de equipos computarizados denominados generalmente Tecnologías de la Información (TI). Estas tecnologías esquematizan los beneficios de la economía globalizada y las capacidades de

quienes tienen acceso a la información bien sean entes regionales, nacionales e internacionales mediante la figura representativa de Internet (Herrera, 2001).

Desde una perspectiva más amplia, los sistemas de navegación por satélite contribuyen con la geomática, a través de sus receptores de señal, a servicios de posicionamiento de alta precisión en procesos de monitoreo de recursos terrestres, asimismo permite determinar las coordenadas geográficas de un punto para fines tan variados como la navegación, el transporte, geodesia, hidrografía, agronomía entre otros. En el caso de sistemas espaciales de observación de la Tierra, las plataformas describen una trayectoria que puede ser de diversos tipos; en algunos casos son estacionarios, otros giran siguiendo el recorrido del Sol y otros giran de un polo a otro o en la zona ecuatorial.

Existen sensores que identifican efectos climatológicos; incluso algunos realizan tomas estereoscópicas para hacer un mejor análisis del terreno de forma tridimensional, y otros permiten determinar los niveles de humedad, importante para los cultivos (Castro, 2011). Por su parte, también existen sensores capaces de identificar los recursos terrestres, las especies vegetales o animales, acuáticas, marinas y continentales, para la generación de conocimiento, valoración y análisis geodésicos, de forma que se puedan cuantificar los daños ocasionados a los mismos por las actividades antropogénicas. Una vez que los sensores remotos capturan información geográfica se aplica un post-proceso para dar una referencia geográfica precisa a dicha información y poder interpretar los elementos captados.

La geodesia por su parte es la ciencia que se ocupa de evaluar y medir la forma de la tierra, tomando en cuenta como herramienta fundamental los aparatos receptores de señales satelitales del Sistema de Posicionamiento Global por Satélite. Los principios básicos de la geodesia permiten entender cómo funciona el sistema NAVSTAR GPS de origen norteamericano, y sus sistemas homólogos de navegación por satélite como Galileo, en el caso de la Unión Europea, Glonass en el caso de Rusia y Beidou de origen chino. También, a través de esta ciencia se puede comprender como pequeños receptores portátiles permitiendo alcanzar la suficiente precisión y exactitud

para determinar la ubicación de un objeto de la superficie terrestre y poder representarlo geográficamente a través de un SIG (Nieves, 2008).

Los sistemas de información geográfica se consideran plataformas informáticas compuesta por el hardware, software, los datos, los métodos y los usuarios, a través de los cuales se procesa, relaciona y analiza toda la información de datos geográficos relativos a un territorio, que fueron adquiridos por todas y cada una de las disciplinas que integran y forman parte de la estructura científica de la Geomática (Tapia-Silva, 2014). Dentro de cualquier proyecto geomático, la implementación de un SIG se considera un aspecto de gran relevancia ya que permite cumplir con las etapas básicas de la ciencia geográfica, el inventario de datos de información geográfica, establecer relaciones e interacciones entre sus datos para el reconocimiento integral de las características geográficas, permitiendo detectar las limitaciones y potencialidades de un territorio.

Los resultados de esta disciplina integradora van mucho más allá que la suma de las partes que lo integran y se convierte en un sistema de conocimiento, donde no son importantes las fronteras entre las partes, ni definir el origen preciso de las aportaciones que integran su marco conceptual; sino que pretende en el caso de los sistemas de información geográfica buscar respuestas a cuestiones de tipo espacio-temporal así como integrar datos de diversas fuentes, tales como la percepción remota, las bases de datos estadísticas y los mapas impresos digitales y/o interactivos. Su funcionalidad facilita el manejo, análisis y visualización de estructuras de datos aparentemente incompatibles, de manera que se pueden representar los mapas.

La fotogrametría es la ciencia que se ocupa del estudio de los métodos e instrumentos que permiten determinar la forma, dimensiones y situación del espacio, de objetos y fenómenos por medio de análisis y mediciones realizadas sobre imágenes fotográficas desde diferentes perspectivas, obtenidas a partir de vuelos aéreo fotogramétrico (Ghilani y Wolf 2012). Otra definición más amplia es la aportada por la Sociedad Americana de Fotogrametría y

Teledetección (ASPRS), la cual la define como el “arte, ciencia, y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos” (Molina, 2016). Esto supone un post-proceso de corrección y restitución de los elementos geográficos fotografiados, con el fin de generar información geográfica útil para la producción cartográfica y elaboración de mapas a diferentes escalas. En este contexto, las técnicas fotogramétricas, con más de un siglo de trayectoria y en constante evolución, han logrado reducir sus costos de operación gracias a los avances en las tecnologías de la información (Achile, *et al.*, 2013).

Por tanto es posible afirmar que la geomática constituye la base tecnológica de las ciencias geográficas, que considera las técnicas que emplean los elementos georreferenciados y los elementos básicos del manejo de las tecnologías de la información geografía y el mapeo, para proporcionar las herramientas básicas de software que permiten la integración de información proveniente de diversas fuentes, dada la posibilidad de identificar, ubicar y detallar las características de los elemento del medio geográfico, contribuyendo además con el proceso de entender, usar y manipular los datos e información. Gracias al aumento de la capacidad que tienen las computadoras de procesar grandes volúmenes de datos y con la aparición de la fotogrametría digital, han ido creciendo también las múltiples posibilidades de explotación de las imágenes fotográficas, con el fin de llevar a cabo una administración sustentable e inteligente de los recursos naturales a partir de las características geográficas identificadas.

2.1.2 Inicio y Desarrollo del Software

Se entiende por software al conjunto de programas estructurados que permiten realizar ciertas tareas asignadas a la computadora o máquina, representando la parte lógica y no tangible de un sistema informático. El soporte lógico, según sea el nivel de trabajo de cada programa, se suele clasificar en dos categorías: en software de sistema, necesario para administrar de forma eficiente los recursos de la máquina, y software de aplicación, el cual representa las

aplicaciones específicas que utilizan los recursos de las computadoras (Sánchez, 1995).

Una definición de software más formal según Culebro, *et al.*, (2006) es la atribuida a la IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) en su estándar 729, el cual lo define como “la suma de los programas de cómputo, procedimientos, reglas, documentación y datos asociados que forman parte de las operaciones de un sistema”. Es decir, a través del hardware se le ceden las instrucciones necesarias para que el software realice una determinada tarea. Según el trabajo a realizar, el software suele distinguirse en tres categorías principales: software de sistemas, software de programación y software de aplicación.

Además de esta clasificación, el software es posible clasificarlo según la metodología de distribución. Entre este grupo se encuentran; el software desarrollado por compañías y vendido principalmente por distribuidores, el freeware o software de dominio público, el cual se ofrece sin costo alguno, el shareware, que es similar al freeware, pero suele conllevar una pequeña tasa de pago por usuarios que lo utilicen y por último el vapourware, que es software que no llega a presentarse o que aparece mucho después de lo prometido (Barahona *et al.*, 2005).

En un principio, en la década de los 60, el mundo de la informática aparece dominado por grandes equipos de computadoras instaladas fundamentalmente en empresas y centros gubernamentales. En esta década uno de los principales fabricantes de esos equipos es la compañía IBM (International Business Machines, por su acrónimo en inglés), la cual ofrecía hardware y software de forma conjunta, no siendo común la idea de que los programas fueran algo separado del hardware desde un punto de vista comercial. Por este motivo, el software se distribuía habitualmente junto con su código fuente y generalmente sin restricciones prácticas de uso a los usuarios (Stallman, 2004)

El concepto de software libre (SL) aparece en 1969 con la creación de la red ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network), precursora de Internet. La red ARPANET fue un proyecto público que colocó a disposición del

público en general información referente a investigación de diferentes instituciones académicas y estatales, y los archivos fuentes de muchos programas. Sin embargo, no fue hasta inicios de la década de los 70, cuando IBM anunció públicamente que el software que venía con las computadoras se comercializaría por separado. Esto supuso que sus clientes ya no podían obtener, incluido en el precio del hardware, los programas que necesitaban. Este hecho marcó el inicio de lo que es hoy el software comercial privativo, ya que se comenzó a percibir como algo con valor intrínseco, y de esta manera se fue haciendo más habitual restringir el acceso a los programas, con lo que se fueron limitando las posibilidades que tenían anteriormente los usuarios de compartir, modificar o estudiar el software (Healy and Schussman, 2003). Estas restricciones impuestas a los usuarios por algunas compañías se fueron incrementando mediante el uso de acuerdos de licencia o derecho de autor.

Dadas las tendencias comerciales, en la década de los años 80 Richard Stallman crea la Free Software Foundation (FSF), y en 1984 comienza a trabajar en el proyecto GNU, es un acrónimo recursivo de "GNU's Not Unix" (GNU no es Unix) de diseño parecido al sistema operativo Unix, desarrollado por la FSF, pero se diferencia de éste por ser software libre, lo que da pie a su desarrollo y con ello a múltiples aplicaciones libres (Stallman, 2005). Con este motivo se introduce la definición de free software y el concepto de "copyleft", desarrollado para otorgar a los usuarios libertad en cuanto al uso y manejo del software y para restringir las posibilidades de apropiación del software por parte de terceros (Barahona *et al.*, 2005). En este sentido, Stallman establece que un programa de software para que se considere como SL, debe cumplir con las cuatro libertades de los usuarios de software, siendo estas:

- Libertad 0: La libertad de usar el programa, con cualquier propósito.
- Libertad 1: La libertad de estudiar cómo funciona el programa, y adaptarlo a unas necesidades particulares. El acceso al código fuente es una condición previa para esto.
- Libertad 2: La libertad de distribuir copias.

- Libertad 3: La libertad de mejorar el programa y hacer públicas las mejoras a los demás, de modo que toda la comunidad se beneficie.

El término free software o software libre, tal y como está definido por la FSF, es aquel que viene con autorización para que cualquier usuario pueda usarlo, copiarlo y distribuirlo libremente, ya sea literalmente o con modificaciones, de forma gratuita o mediante un pequeño coste de distribución. Sin embargo, en algunos casos no es obligatoria esta condición y, aunque conserve su carácter de libre puede ser vendido comercialmente. En consecuencia, esto significa que el código fuente debe estar disponible en todo momento y sin restricciones. Es por esto que el SL es protegido con copyleft, garantizando su libertad (Stallman, 2005).

El término de copyleft, acuñado por la FSF, fue empleado para proporcionar a los usuarios libertad de copiar, modificar y redistribuir software sin que este se convirtiera en software propietario (restricción del código fuente). El concepto de copyleft empleado en el proyecto GNU se pone de manifiesto en el desarrollo de un sistema operativo completo que además de incluir el núcleo tenía algunos programas, entre ellos procesadores de comandos, ensambladores, compiladores, intérpretes, depuradores, editores de texto, gestores de correo y muchos otros (Stallman, 2004). En la mayoría de programas del proyecto GNU se implementa una forma específica de copyleft, a través de la Licencia Pública General de GNU, por sus siglas en inglés (GNU General Public License) o GPL de GNU.

Copyleft emplea la ley de copyright, pero con el propósito opuesto al habitual, es decir, dándole la vuelta para que en lugar de privatizar el software lo ayude a preservarlo como software libre. Por ello, se distribuye con una licencia concreta, la cual permite que se garantice su libertad. Este tipo de licencia suele ser más o menos restrictiva según los requerimientos del promotor del proyecto. Según Barahona, (2005) cabe distinguir entre los siguientes tipos de licencias de software libre:

- a) Licencia pública general de GNU (GPL de GNU), versión 3: Es una licencia de tipo “copyflet”, que obliga a que cualquier redistribución o cambio en el

código fuente del proyecto se distribuya siempre con el mismo tipo de licencia. Su autoría corresponde a la Free Software Foundation (promotora del proyecto GNU) y en un principio fue creada para ser la licencia de todo el software generado por la FSF. Esta licencia GPL, permite la redistribución binaria y obliga a que también se pueda acceder a las fuentes. Las modificaciones permiten añadir código licenciado bajo GPL¹, que se encuentre bajo el mismo código o uno compatible con GPL, de manera que el código aplicado con tales condiciones nunca pueda cambiar. La incompatibilidad de GPL aparece cuando se restringen ciertos derechos que la licencia GPL garantiza, ya sea explícitamente, en contradicción con algunas cláusulas, o implícitamente, imponiendo algunas nuevas.

b) Licencia BSD (Berkeley Software Distribution).

Su origen viene de versiones anteriores de UNIX, este tipo de licencia exige dar crédito a los autores, de igual forma permite tanto la redistribución binaria, como la del código fuente, aunque no necesariamente obliga a que la redistribución sea con el mismo tipo de licencia. Esto da permiso a realizar modificaciones y ser integradas con otros programas casi sin imponer restricciones, es decir, que básicamente les asigna la autoría a los autores originales. Es una licencia permisiva, aunque sin copyleft, es compatible con la GPL de GNU, ya que ha sido una consecuencia práctica por la difusión de estándares al igual que los protocolos de internet. Un ejemplo de uso de esta licencia es XWindows Tcl/Tk y Apache.

c) Licencia Pública General Reducida de GNU (LGPL de GNU), por sus siglas en inglés (Lesser General Public License), versión 3.

Creada por la FSF, permite el uso de programas libres con software propietario. Se distribuye como si se tratara de una licencia GPL, permitiendo la integración

¹ Licencia Pública General del proyecto GNU (conocida por su acrónimo en inglés GPL o General Public License), es el tipo de licencia que garantiza la libertad del código fuente en todo momento.

con cualquier otro software y sin prácticamente limitaciones. Desde sus inicios esta licencia estaba orientada a la gestión de bibliotecas, por lo que se puede potenciar su uso y desarrollo sin tener los problemas de integración que implica la licencia en modo GPL. Un ejemplo de este tipo es el navegador Mozilla.

d) Licencia Pública General Afferro de GNU (AGPL), por sus siglas en inglés (Afferro General Public License), versión 3.

Se caracteriza por ser una licencia de software libre con copyleft. Contiene términos similares a los establecidos en la de tipo GPLv3, con la diferencia de que en este caso se permite a los usuarios que interactúan con el software bajo esta licencia en red recibir la fuente de tal software. Por tal motivo se recomienda a los desarrolladores que tomen en cuenta el uso de la AGPL de GNU para todo el software que se ejecute de forma habitual en red.

e) Licencia Apache.

Aquellos programas bajo este tipo de licencia permiten a los usuarios distribuirlos, modificarlos, y distribuir además versiones modificadas del mismo debiendo preservar el copyright. Este tipo de licencia no exige que las obras derivadas de modificaciones se distribuyan empleando la misma licencia, ni siquiera como software libre, exigiendo solamente notificar a los receptores que en la distribución se ha empleado código bajo licencia Apache.

f) Licencia Pública de Mozilla (MPL), por sus siglas en inglés (Mozilla Public License), versión 2.

Este tipo de licencia proporciona compatibilidad con las licencias GPL de GNU versión 2.1, con LGPL de GNU versión 3 y con AGPL de GNU, por tanto se puede combinar cierta licencias MPL con otras soluciones que estén bajo licencias GNU. Ello permite la distribución del desarrollo bajo MPL con los términos de licencias de GNU, pero con la condición de que los archivos, que originalmente estaban disponibles bajo GNU, sigan estando disponibles bajo los términos de lo establecido en la licencia MPL, es decir, se deberán conservar los términos de MPL bajo las condiciones de una de las licencias de GNU sin más restricciones.

g) Licencia X Windows versión 11.

Esta licencia, ofrece al usuario un producto totalmente libre, con la posibilidad en cualquier momento de poder limitar las libertades con las que se ofreció inicialmente. Este tipo de licencia es empleada para la distribución del sistema X Window, el sistema de ventanas más ampliamente utilizado en el mundo Unix, y también en GNU/Linux. Aunque es una licencia parecida a la licencia BSD, permite la redistribución, uso y modificación prácticamente sin restricciones. Un ejemplo de distribución bajo esta licencia son los trabajos derivados de X Windows como XFree86.

2.2 Organismos de Estandarización y/o Normalización de la Información Geográfica

Sin duda alguna, la democratización del uso de la información geográfica está fundamentada principalmente en el concepto de interoperabilidad. Esta se inicia con acuerdos institucionales de colaboración, los cuales se han llevado a cabo en el mundo político-administrativo, pasando después de varios años al ambiente digital donde, específicamente, en su entorno actual de la información geográfica, se concretiza en lo que conocemos como Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). El desarrollo de una infraestructura de información requiere poder contar con el compromiso de que todos los actores que participan en su desarrollo se involucren para que la información estandarizada fluya hacia todos los usuarios con transparencia y fiabilidad.

El proceso de normalización o estandarización en el campo de la información geográfica se remonta al siglo XIX con el establecimiento de normas para la representación cartográfica de la información, las cuales tienen que ver con la producción de mapas. Dicho proceso se vio influenciado por la era de la tecnología informática y el análisis geográfico aplicado a la gestión del territorio, motivo por el cual se originó la necesidad de generar un conjunto de reglas para que se regulara el uso de la información geográfica y promoviera la interoperabilidad. Este conjunto de reglas de estandarización de la información geográfica tienen como objetivo facilitar la comprensión, el acceso, la integración y la reutilización de manera eficiente de la información geográfica, y

en definitiva debe garantizar la interoperabilidad entre los diferentes sistemas (Ariza y Rodríguez, 2008).

En la década de los años 70 se comenzaron a desarrollar los estándares y formatos de intercambio de datos geográfico por diversos grupos de usuarios. Posteriormente, en los años 80, se comenzó a formalizar la normalización de la información geográfica moderna, la cual fue fortaleciéndose a finales del siglo XX, y fue avanzando rápidamente a partir de la creación del OGC y el Comité Técnico 211 de la Organización Internacional de Normalización (ISO) (ISO/TC211) (Ariza y Rodríguez, 2008).

En este escenario Taylor (2001) describe el conjunto de organizaciones encargadas del desarrollo de especificaciones y estándares en el campo de la información geográfica como aquellas para asegurar que exista un grado de solidez en contenido y estilo para los datos geográficos de modo que se garantice el intercambio entre usuarios y/o sistemas. En este contexto, se han desarrollado numerosas iniciativas que han hecho posible que las IDEs sean operativas y funcionales. Entre todas ellas destacar la iniciativa Global Spatial Data Infrastructure (GSDI) (<http://www.gsdi.org/>), la cual proporciona a nivel mundial normas internacionales para apoyar el desarrollo de IDE nacionales e internacionales. En Europa, la Directiva INSPIRE creada en 2007, fomenta la creación de una IDE europea en la que los datos sean homogéneos y la información pueda compartirse libremente. Por otra parte, el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) con su Comité Permanente para las IDE de las Américas (CP-IDEA), promueve la creación de una IDE continental, para que los países puedan compartir los datos de áreas de influencia común. Igualmente, a nivel nacional, una gran mayoría de los países desarrollados o en vías de desarrollo ya tienen en marcha iniciativas para homogeneizar y compartir sus datos (Olaya, 2014).

En otro escenario, una de las organizaciones que han contribuido con la interoperabilidad a nivel mundial ha sido el World Wide Web Consortium (W3C), aunque no guarda una relación directa con los SIG, persigue objetivos similares a los organismos mencionados anteriormente que elaboran

estándares en el ámbito de la información geoespacial en función de una mayor interoperabilidad, pero en su campo de actuación que es la red. En este sentido, la misión del W3C es llevar la web hacia su máximo potencial a través del desarrollo de protocolos que garanticen el futuro crecimiento de ésta.

Además, destacar la labor desarrollada por el Open Geospatial Consortium (OGC), fundado en 1994 (<http://www.opengeospatial.org>). OGC es una organización internacional, voluntaria sin fines ánimo de lucro, conformado por más de 400 organizaciones, incluyendo entre ellas miembros comerciales, gubernamentales, académicos y empresas de los sectores público y privado, dedicado al desarrollo de estándares de servicios basados en localización y geo-información (Nogueras-Iso *et al.*, 2005). Su misión es promover el uso de estándares y tecnologías abiertas en el área de sistemas y tecnologías de la información geográfica y áreas afines para lograr que los servicios estén disponibles a través de la red, aplicación o sistema. Para ello define, por consenso, especificaciones de interoperabilidad que están disponibles para uso global (Nebert, 2002).

Actualmente el Comité técnico del OGC promueve la creación de grupos de trabajo, constituidos por voluntarios de las organizaciones miembros. Los resultados de los grupos de trabajo se traducen en estándares abiertos y públicos que ofrecen soluciones interoperables y facilitan el acceso, la manipulación e intercambio de la información geográfica en la web (Percivall *et al.*, 2008). OGC colabora estrechamente con el Federal Geographic Data Committee (FGDC) y el Comité Técnico TC 211 de ISO mediante acuerdo llevado a cabo en el año 1999 con el propósito de generar estándares espaciales globales mediante un grupo de coordinación basado en ciertos términos de referencia.

Las especificaciones OGC garantizan la interoperabilidad de contenidos y servicios de la información geográfica. Este conjunto de especificaciones se basan en servicios a emplear por la mayoría de las IDEs, entre los que se encuentran; los servicios WMS, WCS, WFS, WPS, CSW y formatos de intercambio como GML. Cada uno de estos estándares está desarrollado en las

especificaciones OGC, estando además sujetos a cambios con el fin de mejorarlos y actualizarlos.

La Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization, ISO) creada en el año 1947, es una organización de carácter internacional dedicada a la elaboración de estándares no solo en el ámbito geográfico, sino en todas las ramas de la industria, principalmente para el intercambio de bienes y servicios, y en la que están representados más de 160 países. ISO es responsable junto a otras organizaciones públicas y privadas de gestionar estándares bien definidos, tales como los relacionados con la gestión medioambiental en empresas o los estándares de calidad entre otros, habiendo publicado más de 18.000 documentos normativos (Ariza y Rodríguez, 2008).

Desde su creación, los aportes en el campo geográfico se presentaron en el año 1994 con la creación del llamado Comité Técnico para la información geográfica y geomática (ISO/TC 211 Geographic Information / Geomatics). Entre las funciones del comité destaca la creación de un conjunto estructurado de normas internacionales sobre los métodos, herramientas y servicios, adquisición, procesamiento, análisis, acceso y disponibilidad de la información geográfica, posibilitando la interoperabilidad geoespacial. Este conjunto estructurado de normas se corresponde a la familia de normas ISO 19100.

El objetivo del desarrollo de estos estándares por parte de ISO es aumentar el entendimiento y uso de la información geográfica, incrementar la disponibilidad, acceso, integración y distribución de la información geográfica, promover el uso eficiente, eficaz y económico de la información geográfica digital, así como los sistemas de hardware y software relacionados, y contribuir a un enfoque unificado para solucionar los problemas ecológicos y humanitarios en el ámbito global. Para ello, el TC 211 ha desarrollado estándares en el ámbito de la información geográfica específicamente en las áreas de normalización de la administración de datos, normalización de los servicios de información, organización del modelo de referencia, marco y modelo de referencia, normalización del modelo de datos y operadores, normalización de perfiles, entre otros y muchos más.

La Global Spatial Data Infrastructure (GSDI), fundada en 1996, viene guiando el desarrollo de iniciativas IDE locales, nacionales y regionales. Es una organización que agrupa a otras organizaciones, agencias, compañías y usuarios de todo el mundo con objeto de apoyar las IDE y su desarrollo con carácter global. Entre sus objetivos se encuentra servir como punto de contacto para todos aquellos usuarios de la comunidad global que estén implicados en el desarrollo, implementación y avance de los conceptos de las IDEs, impulsar las IDEs que apoyan los sistemas sociales, económicos y medioambientales, y promover el uso responsable de la información geográfica y las tecnologías para el beneficio de la sociedad.

GSDI apoya el acceso global y público a la información geográfica a través de acciones coordinadas entre países y organizaciones, promoviendo la sensibilización e implementación de políticas afines, la estandarización y los mecanismos efectivos para el desarrollo, accesibilidad e interoperabilidad de datos geográficos digitales y tecnologías, como base para la toma de decisiones en todas las escalas y con múltiples propósitos (GSDI, 2009). Estas acciones comprenden las políticas, la gestión organizativa, los datos, las tecnologías, los estándares, los mecanismos de transmisión y los recursos humanos y financieros necesarios para asegurar que quienes trabajan a escala global y regional no encuentren impedimentos para cumplir sus objetivos como los de generación de nueva información o la actualización de la ya existente, la cual contribuirá en el desarrollo de IDE.

GSDI también apoya la creación y expansión de IDEs a escala local, nacional y regional, compatibles a nivel mundial, fomentando a su vez la comunicación internacional, la creación de redes y los esfuerzos de colaboración para promover innovaciones en todo lo relacionado con una IDE. Para ello, apoya la investigación interdisciplinaria y las actividades educativas que hacen avanzar los conceptos, métodos y teorías entorno a las IDEs, permitiendo una mejor política pública y toma de decisiones científicas a través de los avances y aplicaciones de las Infraestructuras de Datos Espaciales, promoviendo el uso ético y el acceso a la información geográfica, fomentando el desarrollo de las IDEs como soporte de las necesidades mundiales importantes como la mejora

de la eficacia local para aumentar la competitividad económica nacional, abordar la calidad medioambiental global, aumentar la eficiencia, la efectividad y la igualdad en todos los niveles de gobierno, y la mejora de la salud, seguridad y bienestar social de la humanidad en todos los países.

La Infraestructura de Datos Espaciales de Estados Unidos (National Spatial Data Infrastructure, NSDI), creada en 1994 a partir de la orden ejecutiva 12906, promueve la construcción de una IDE de carácter nacional y coordinada entre las administraciones federal, estatal y local, con la participación del sector privado y académico (Maguire y Longley, 2005). Esta orden recoge las propuestas redactadas por el FGDC, el cual queda como el ente responsable de los avances de NSDI en el ámbito federal. La FGDC fue creada en 1990 y representa a las principales agencias federales independientes de Estado Unidos con especial competencia en la producción de información geoespacial además de otros organismos de la administración estatal y local, así como al sector privado y universitario (FGDC, 1993). Entre sus objetivos la FGDC, plantea (Echeverría M. 2001):

- La implantación de mecanismos para el descubrimiento, acceso y distribución de datos, materializados en una red distribuida que enlace a los usuarios de información geográfica.
- El establecimiento de estándares de intercambio de información.
- La identificación y desarrollo de los conjuntos de datos espaciales más comunes y habitualmente necesitados.
- La difusión pública de la información espacial producida por la administración federal.
- El establecimiento de acuerdos entre organismos para la producción de información de interés, de forma que se eviten solapes y esfuerzos duplicados.

A nivel europeo, la directiva europea INSPIRE es la encargada de todo lo relativo a la información geográfica en Europa. Ha sido desarrollada en

colaboración entre los estados miembros y países en estado de adhesión en Europa con el propósito de hacer disponible información geográfica relevante, concertada y de calidad de forma que se permita la formulación, implementación, monitorización y evaluación de las políticas de impacto o de dimensión territorial de la Comunidad Europea. INSPIRE es una iniciativa legal que establece estándares y protocolos de tipo técnico, aspectos organizativos y de coordinación, políticas sobre la información que incluye el acceso a los datos y la creación y mantenimiento de información espacial (INSPIRE, 2007). La directiva, entre sus objetivos principales destaca la disposición de los datos espaciales para la toma de decisiones, el establecimiento de servicios integrados de información basados en una red distribuida de bases de datos enlazadas a protocolos comunes que aseguren la interoperabilidad y la optimización de los datos disponibles mediante la documentación de la información espacial.

En Sur América destaca el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), creado el 7 de febrero de 1928 durante la VI Conferencia Internacional celebrada en La Habana, Cuba, a nivel de Ministros de Estados Americanos. El IPGH es un organismo internacional, científico y técnico de la Organización de los Estados Americanos, dedicado a la generación y transferencia de conocimiento especializado en las áreas de cartografía, geografía, historia y geofísica; con la finalidad de mantener actualizados los datos e información espacial, manteniendo una permanente comunicación con los investigadores e instituciones científicas de los Estados Miembros.

El World Wide Web Consortium (W3C), es una comunidad internacional en la que se desarrollan estándares para mantener el crecimiento de la Web a largo plazo. En esta comunidad internacional se trabaja conjuntamente en el desarrollo de normas para la Web con objeto de encaminarla hacia su máxima capacidad, basándose en protocolos comunes de manera que promuevan su evolución y aseguren su interoperabilidad. El W3C se fundó en el año 1994 por Tim Berners-Lee, a fin de que este organismo velara por el correcto funcionamiento de la web. Sin embargo, años antes ya se había presentado la World Wide Web fuera del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear

(CERN) (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) en la Hypertext Conference.

El valor social que aporta la Web hace posible la comunicación humana, el comercio y las oportunidades para compartir conocimiento. Uno de los objetivos principales del W3C es hacer que estos beneficios estén disponibles para todo el mundo independientemente del hardware, software, infraestructura de red, idioma, cultura, localización geográfica, o habilidad física o mental. La mayoría del trabajo realizado por el W3C gira en torno a la estandarización de las tecnologías Web. Para llevar a cabo esta labor el W3C cumple una serie de procesos que fomentan el desarrollo de estándares de alta calidad basados en el consenso de la comunidad. Recientemente el W3C y el International Digital Publishing Forum (IDPF) se han fusionado para alinear las tecnologías de la Web, de la edición y de la publicación digital.

Dentro de los proyectos definidos por la W3C, resulta de especial interés el lenguaje de marcado extensible XML (por sus siglas en inglés, extensible Markup Language). XML además de hacer más sencilla la interpretación de documentos con máquinas, es una guía la cual permite definir la gramática de otros lenguajes, de esta forma se puede emplear para definir ciertas reglas que permitan recoger cualquier tipo de información, lo que hace posible el intercambio de información a todos los niveles (Olaya, 2014).

2.3 Sistemas de Información Geográfica e Infraestructuras de Datos Espaciales

Los SIG se han convertido en instrumentos claves en los procesos de toma de decisiones tal y como lo demuestran muchas de las aplicaciones en el ámbito de la gestión de grandes infraestructuras, desde el punto de vista de los parcelamientos catastrales en la planificación y/o en la ordenación del territorio (Rodríguez, 2014). Los SIG contribuyen con la resolución de problemas de localización espacial sobre el territorio, por ejemplo localización de instalaciones y equipamiento de uso público, lo cual hacen a estas herramientas informáticas idóneas para los procesos estratégicos de planificación. Asimismo, es importante destacar la importancia que tienen los

datos, la información geográfica y las fuentes de información, ya que constituyen uno de los principales componentes de los SIG en donde confluyen distintas disciplinas complejas, las cuales emplean distintos tipos de datos provenientes de diversas fuentes.

Un SIG ha de permitir múltiples operaciones entre las que se encuentran, lectura, edición, almacenamiento, gestión y análisis de datos espaciales, y generación de mapas, informes, gráficos, etc. Una primera definición puede ser entendida según Rodríguez (2014), como un complejo sistema de almacenamiento y procesamiento de datos que tiene como fin la producción de información espacial útil en diferentes campos del conocimiento. Debe servir además para la elaboración de mapas, modelos espaciales y datos estandarizados que facilitan la automatización y procesamiento de la información.

El término SIG, integra diversas áreas de conocimiento por lo que existen varias definiciones que ponen en evidencia la amplitud de sus fronteras, siendo una de las más aceptadas la proporcionada por la National Centre of Geographic Information And Analysis (NCGIA), la cual lo define como “un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión” (Maguire *et al.*, 1991). Esta definición proporciona una idea general de lo que es un SIG, sin embargo existen otras definiciones relacionadas pero desde distintas perspectivas, como las definiciones globales, funcionales y tecnológicas.

Desde un punto de vista global, se corresponde con los objetivos generales de los SIG, por tanto no especifican las funciones o métodos concretos que utilizan. En este sentido, se define como un “elemento integrador que permite analizar, presentar e interpretar hechos relativos a la superficie terrestre” (Tomlin, 1990). Otros lo definen como un “sistema especializado de bases de datos, caracterizado por su capacidad para manejar datos geográficos, que

están georreferenciados y puedan ser visualizados como mapas” (Suárez *et al.*, 2007).

Desde el punto de vista funcional, estas definiciones atienden a las tareas básicas que deben realizar los SIG desde la comprensión al uso de datos espaciales. En este sentido, varias definiciones coinciden en cuanto a las funciones de entrada de datos, almacenaje, recuperación, análisis, modelado y representación de los datos. Ordoñez y Martínez-Alegría (2003) lo definen como una herramienta informática para almacenar, procesar y analizar datos con alguna componente espacial. Sin embargo, existen otros componentes como el hardware, que engloba la parte física de las computadoras; y el software, que representa el conjunto de programas ejecutables, permitiendo obtener diferentes resultados tras un adecuado procesamiento. Otra definición la hace la compañía ESRI, donde un SIG “es un conjunto de hardware, software y datos geográficos para capturar, manipular, analizar y mostrar información geográficamente referenciada.

Desde la perspectiva tecnológica las definiciones de los SIG reflejan un marcado interés especial por la técnica empleada, es decir, destaca la importancia de la informática, siendo definido por Star and Estes (1990) como un “sistema informático diseñado para trabajar con datos referenciados con coordenadas espaciales o geográficas de localización”. En otras palabras, un SIG es un sistema de base de datos con capacidades específicas para datos georreferenciados. En tanto Rodríguez Pascual, citado por Suárez *et al.*, (2007), lo define como un “modelo informatizado del mundo real, descrito en un sistema de referencia ligado a la tierra, establecido para satisfacer unas necesidades de información específicas respondiendo a un conjunto de preguntas concretas”. No obstante, el papel integrador de los SIG hace que sean herramientas para la gestión de resultados y elementos producidos por otras tecnologías, las cuales han tenido su enfoque en el aprovechamiento de la información espacial, conectadas en gran medida a un SIG, permitiendo ampliar su alcance y potencializar sus capacidades.

En la década de los sesenta, con el desarrollo de la tecnología informática, aparecieron una serie de programas como SYMAP (Synteny Mapping and Analysis Program), IMGRID (Interactive Manipulation GRID), CALFORM, SYMVU, GRID entre otros, que sirvieron de inspiración a futuros desarrollos comerciales y cuya finalidad era gestionar una gran gama de datos espaciales. Carmona y Monsalve (2008) indican que durante esa década, se aplicó la tecnología del computador digital al desarrollo de la tecnología automatizada. En este escenario la mayoría de programas relacionados con la información geográfica estuvieron dirigidos en todo momento hacia la automatización de trabajos cartográficos; apareciendo nuevos métodos para el manejo de información geográfica, bajo el criterio de producir información basada en el análisis espacial.

En este contexto, en el año 1962, se desarrolla el primer sistema de información geográfica, con el nombre de Canadian Geographic Information System (CGIS), bajo la dirección de Roger Tomlinson, en Ottawa (Ontario) por el Departamento Federal de Desarrollo Rural y Forestal del gobierno de Canadá. CGIS se desarrolló con el objetivo de almacenar, analizar y manipular información para el “Canada Land Inventory” (CLI), una iniciativa para determinar la capacidad del uso del suelo en zonas rurales con información sobre tierras, agricultura, recreación, flora y fauna, zonas forestales, etc. Una de las aportaciones más importantes de CGIS fue su capacidad de superponer distintas capas de información y permitir el análisis espacial de datos geográficos (GIS World, 1996).

Los datos geográficos, pieza clave del análisis espacial, son el elemento principal de trabajo con un SIG. Por tanto, no tiene sentido un SIG si no se consideran a los datos como parte integral de su núcleo. Entre los datos, el software y el hardware existe una estrecha relación que hace posible el manejo de éste. En sus inicios, los primeros SIG dieron solución a muchos problemas de codificación de datos, permitiendo adaptar la cartografía disponible. Los primeros datos geográficos empleados provenían de la digitalización de cartografía impresa en papel. Las primeras bases de datos geográficos contenían mapas escaneados de tipo raster, es decir, datos de tipo continuo

representables mediante celdas o pixel y algunos elementos digitalizados de tipo vectorial, es decir, representaciones discretas mediante elementos geométricos de puntos, líneas y polígonos (Castellanos-Barrero, 2010).

Las fuentes para obtener información de la superficie de la Tierra fueron evolucionando hasta que en el año 1960, el hombre lanza el primer satélite de observación meteorológico, TIROS I. Dos años más tarde, Rusia lanzaría su satélite Kosmos. Posteriormente y no menos importante surgen otros hechos como los lanzamientos de los satélites LANDSAT 2 y 7 en 1975 y 1999 respectivamente. A inicio de los años 80, se crea el satélite SPOT y es la primera empresa en ofrecer con carácter comercial imágenes procedentes de dicho satélite para toda la superficie terrestre (Labrador *et al.*, 2012). Estos productos pasan a constituir una fuente de negocio, ya que se van incorporando como elementos básicos por la extracción de un gran volumen de información para el análisis geográfico. En esta década, aparece la tecnología del sistema de posicionamiento global para la geolocalización como otra fuente de datos de primer nivel que, contribuyendo además con la creación de elementos de terreno mediante su dimensionamiento.

Del mismo modo que las aplicaciones fueron evolucionando, también los datos geográficos digitales se han ido popularizando, durante la década de los años 70 se publica el primer Modelo Digital de Elevaciones (MDE) por el servicio geográfico de Estados Unidos (USGS). En el año 2000 a partir del proyecto Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) y con el propósito de ofrecer información altimétrica del 80% de la superficie terrestre se produce un MDE global con una resolución espacial de 30 metros. Además, aparece una nueva técnica de extraer información del terreno mediante sensores activos como la tecnología LiDAR, la cual proporciona una mayor precisión en cuanto a los modelos de caracterización del terreno (Star y Estes, 1990).

Con los avances tecnológicos de la época, el núcleo entorno al cual evolucionaron los SIG se vio influenciado por los principales bloques del desarrollo informático, es decir, por los datos de entrada; que se digitalizaban y almacenaban mecánicamente en tarjetas perforadas en un único proceso

mecánico, siendo un factor limitante importante la obtención de datos de salida ya que tanto las computadoras como las impresoras tenían capacidades limitadas. No obstante, su representación en ese entonces se basaba en el uso de caracteres y no en gráficos propiamente dichos. El desarrollo de las capacidades gráficas, ha sido seguida por los SIG, que progresivamente fueron incorporando mejoras tanto en la representación en pantalla como en la generación de mapas impresos (Heywood, 1998).

A partir de la ciencia del análisis geográfico otras ramas de conocimiento fueron desarrollándose a la vez que evolucionaban los SIG, como los programas de diseño asistido por computadora (Computer Aided Design, CAD). Desarrollos dirigidos inicialmente hacia aplicaciones de diseño industrial para posteriormente ser utilizados en la arquitectura para el diseño y delineación de elementos geográficos. En la actualidad los SIG incorporan funcionalidades similares a los sistemas CAD, que permiten tanto la digitalización de cartografía con las herramientas propias del CAD como la creación de nuevos elementos geográficos (Olaya, 2014). Del mismo modo, los formatos comunes de las aplicaciones CAD son soportados por un gran número de SIG, permitiendo cierta interoperabilidad con los datos para la solución de problemas. En este sentido se generaron productos como ARC-INFO en el ámbito SIG o IGDS en el ámbito CAD.

Las aplicaciones CAD permiten el diseño informatizado de diversos elementos, que van desde una pieza industrial a un dibujo arquitectónico de un edificio de mayor relación con los SIG. El uso de herramientas CAD en disciplinas como la arquitectura para la creación de planos tiene cierta similitud con el uso de un SIG, ambas herramientas se han enriquecido la una de la otra en cuanto a sus capacidades funcionales. Sin embargo, siguen existiendo grandes diferencias que hacen que cada tipo de aplicación responda a necesidades concretas pese a la existencia de características comunes. De entre estas diferencias cabe destacar; que el propósito de los SIG es reflejar la realidad del terreno ya creado, mientras que el de las herramientas CAD es diseñar y proyectar para posteriormente acometer una actuación en el territorio. En cuanto al almacenamiento de la información, en los SIG se da mayor peso a la gestión

de los datos, mientras que en las aplicaciones CAD la parte visual es fundamental, y su almacenamiento así lo refleja. Un dato SIG se almacena como un dato geográfico complejo, mientras que en un CAD se almacena básicamente como un simple dibujo, ya que es su principal enfoque de trabajo (ESRI, 2002).

En este orden de ideas, junto al avance de aplicaciones informáticas fue avanzando también el desarrollo de las aplicaciones SIG permitiendo con ello diferenciar entre un tipo de SIG de representación vectorial de otro con representación por celditas o pixeles. En este caso, aparece en 1964 SYMAP, aplicación que permitía la entrada de información en forma de puntos, líneas y áreas, lo cual se corresponde con archivos en formatos vectoriales. Este software, pese a sus carencias, despertó el interés para la producción cartográfica, lo que permitió la evolución hacia sistemas mucho más avanzados. Posteriormente David Sinton en 1969, crea el programa GRID, un programa en el que la información es almacenada en forma de cuadrículas o celditas. Este hecho marcaría el inicio de los Sistemas de Información Geográfica para formatos tipo ráster (Olaya, 2014).

Los formatos de intercambio contienen información apropiada que permiten el uso de los datos en una serie de sistemas diferentes, como también llevan un mínimo de metadatos para describir el conjunto de datos, e informes sobre la calidad de éstos. A este respecto, existen básicamente dos tipos de formatos de archivo: ASCII y binarios. El formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange) es un estándar que asigna un valor numérico a cada carácter siendo posible representar los documentos a modo de texto plano y hacerlos legibles por los usuarios (Martínez, 2006). El archivo binario por su parte, es un archivo informático que contiene información de cualquier tipo codificada en binario para el propósito de almacenamiento y procesamiento en la computadora. Este tipo de archivo maneja los formatos de imágenes (.jpg, .gif, .tiff, .bmp, .wmf, etc), así como los archivos ejecutables de muchos programas. Un código binario no es legible por los usuarios, empleando solo ceros y unos para su codificación haciendo corresponder a cada símbolo del alfabeto fuente.

Por otra parte, se han desarrollados formatos abiertos que son implementados por programas propietarios o libres, utilizando las licencias típicas en cada caso. Los formatos propietarios o privativos son controlados y definidos por software propietario, su especificación o código fuente y no está disponible. Por otra parte, los formatos abiertos están diseñados bajo un subconjunto de estándares abiertos desarrollados por organismos internacionales, lo cual garantiza el acceso a los datos y favorece el intercambio e interoperabilidad entre softwares (Culebro *et al.*, 2006). En la Tabla 1 se muestran algunos formatos de archivos de entrada y salida, compatibles con algunos modelos de software SIG libres.

Muchas aplicaciones SIG se basan en la tecnología del vector por su representación y entrada de datos en forma de puntos, líneas y áreas, poco complejo debido a la manera de almacenar la localización, sus atributos matemáticos de forma, de posición, las uniones de los atributos, la estructura de la base de datos, e información geográfica contenida. Mientras que los archivos en formato ráster, generalmente formados por celditas o pixeles, la información de la imagen o capa queda registrada y/o almacenada en esas unidades, sirviendo de base para la elaboración de otros documentos cartográficos. Una capa ráster queda caracterizada entre otros aspectos por su resolución espacial, definida por el tamaño de celda o píxel expresada en unidades métricas que indican el tamaño del área de terreno por cada una de sus celdas. Estos archivos requieren de gran cantidad de memoria y espacio para guardar la información (Martínez, 2006).

Tabla 1. Formatos de archivos de entrada compatibles con modelos de software libre

Productos	KOSMO	SAGA	SEXTANTE	gvSIG	uDIG	QGIS
Datos de Entrada y Salida						
DGN	X			X		X
DWG				X		
DXF	X			X, Y		X, Y
SHP	X, Y	X	X	X, Y	X	X, Y
GML/XML				X, Y	X	X, Y
MIF						X
TXT		X	X			X
WKT						
DBF	X	X	X	X		
MDB	X					
CVS				X		X
TAB						X
JPG	X	X, Y	X, Y	X	X	X, Y
PNG	X	Y	Y	X	X	Y
TIFF	X	X, Y	X, Y	X	X	X
GIF		X, Y	X, Y	X	X	X
XLS	Y					
IMG				X		X
BMP	X	X, Y	X, Y	X		X
ECW	X			X		X
DGM		X	X			
ASC						X
DDF						X
DEM						X

Fuente: Elaboración propia (datos de entrada “X”, datos de salida “Y”).

La información geográfica como se mencionó anteriormente en el punto 2.1.1, hace referencia a elementos del territorio como hidrografía, vías de comunicación, relieve, zonas urbanas, límites de recursos naturales, campos, desiertos, selvas, tablas estadísticas, toponimia, etc., presentando todos ellos como característica común la componente espacial. Esta información constituye el conjunto de datos que representan el núcleo de datos fundamentales que requiere una infraestructura de datos espaciales (IDE). Los conjuntos de datos mayormente se componen de colecciones de

características a nivel de detalle y/o coberturas, como imágenes de satélite, vistas, modelos digitales de elevación, etc.

La tecnología sobre la que se basan los SIG es fundamental para comprender todo lo relacionado con ellos y su entorno, tanto su evolución a lo largo del tiempo, como la de los datos. Desde los primeros SIG destinados a usuarios de alto nivel, hasta nuestros días con un uso mucho más habitual y generalizado, se ha originado un cambio enorme que, como era de esperar, ha ido desarrollándose paralelamente al de la propia tecnología de la informática. Es de hacer notar que la razón de ser de los SIG reside en la información o conjunto de datos geográficos, con lo cual es importante conocer la naturaleza de los mismos así como sus propiedades de manera que se puedan integrar datos de diversas procedencias.

La evolución de los datos fue de gran importancia ya que fueron y son la materia prima que contribuye con el desarrollo en la era de la información. En tal sentido, fueron desarrollándose nuevas formas y técnicas de adquirir información geográfica, con lo cual se generaron grandes cantidades de datos espaciales de distintas procedencias, motivo por el que fue necesario formular procedimientos adecuados para gestionar los datos espaciales almacenados. Estos procedimientos pasan por la creación de la mencionada IDE. El éxito de su implementación lo demuestran países como Estados Unidos a través de la NSDI, gestionando gran cantidad de datos espaciales desde su creación en 1994, por su parte España, país de la Unión Europea lo implementa desde el año 2007, a través de la IDEE (Infraestructura de Datos Espaciales de España), bajo las especificaciones y normatividad de la directiva INSPIRE basada en las infraestructuras de los Estados miembros (Craglia, 2009 y Clinton, 1994). El desarrollo de estas actividades está enmarcado por las especificaciones establecidas por OGC.

Los datos son el elemento clave en todo proyecto de construcción de una IDE, pues sin ellos el resto de componentes no tienen ninguna importancia ya que dependen de su interpretación. La preparación de un adecuado conjunto de datos, de acuerdo a políticas institucionales y ciertas normas internacionales,

como las definidas por OGC, así como el software y/o herramientas basadas en Web, son la base para llevar adelante garantías de cualquier proyecto IDE, de manera que éstas ofrezcan una serie de funcionalidades y servicios a través de internet, útiles a una gran diversidad de usuarios.

En este contexto, el uso de los SIG fue aumentando enormemente en la década de los 80 y 90, y dada su popularización también fue en aumento la demanda del software (Bosque. *et al.*, 1998). El software como parte fundamental de la estructura lógica de los SIG, encargado de realizar distintas operaciones sobre la base de datos, como las tareas complejas de consulta, visualización y cálculos estadísticos, permitiendo a su vez controlar el acceso a los datos, es también de gran importancia para la construcción de una IDE, ya que permiten a través de los servicios publicar información cartográfica de interés. Hasta hace unos pocos años, la comercialización de estas herramientas para el manejo de información espacial estaba sustentada por unas pocas empresas. Razón por la cual eran numerosas las ofertas de programas SIG propietarios, dentro de los que destacan algunos como Arcinfo, Idrisi, Mapinfo, Erdas, Microstation, GenaMap, Atlas Gis, ArcView, ArcGIS, etc.

En un principio este tipo de herramientas no aparecen introducidas dentro de la corriente generada alrededor del software libre en la década de los 80 y como consecuencia había una ausencia de herramientas de gran capacidad de proceso para la época. La consecuencia de todo ello es que al inicio la mayoría de usuarios fueron clientes de software propietario, situación que ha empezado a cambiar significativamente en esta última década con la aparición de nuevos proyectos libres tan diversos como visores, editores, aplicaciones SIG complejas y servidores web; todos ellos con un lazo en común centralizado en los SIG y que forman parte de la arquitectura de una IDE. Entre los visores y editores de información geográfica para un cliente pesado o de escritorio, el cual trabaja desde una aplicación destacan ViewFinder, MapWindow, TatukGIS Viewer, ArcExplorer, FreeView, Quantum GIS (QGIS), GvSIG, MapSheets, OpenMap, GeoExpress, TNTLite, Forestry GIS, Jump y Kosmo, entre otros. Asimismo destacan algunas de las aplicaciones SIG completas del lado cliente como Saga, Spring, GRASS, GMT Generic Mapping Tools y Sextante. En el

caso de clientes ligeros, el cual trabaja en una arquitectura de red cliente-servidor destacan GeoServer, MapServer, GeoClient, CartoWeb, MapGuide Open Source, y las librerías OpenLayers, entre otros (Ortiz, 2011 y Pons, 2009).

Desde esta última década los SIG se comienzan a utilizar con frecuencia en cualquier disciplina que necesite la combinación de información geográfica y bases de datos como ingeniería civil, estudios medioambientales, estudios socioeconómicos y demográficos (Pons, 2009), planificación de líneas de comunicación (Navarro y Sánchez del Río, 2000), ordenación del territorio (Gutiérrez y Urrego 2011), estudios geológicos y geofísicos, prospección y explotación de minas, entre otros (Carmona y Monsalve 2008).

2.3.1 Infraestructura de Datos Espaciales

El creciente consumo y deterioro a que están sometidos los recursos naturales y la contaminación de la biosfera, ponen en peligro la capacidad de sustento de los ecosistemas, ocasionando la disminución de los recursos naturales. Por ello, la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992 planteó el desarrollo sostenible como una forma de encarar los problemas del desarrollo humano fundamentada en promover sistemas y estrategias integradas de desarrollo, revitalizando el crecimiento y haciendo una ordenación sostenible y equitativa de la base de los recursos naturales, satisfaciendo las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras (Mayoral, 2002). Posteriormente en el año 1997, los gobiernos incorporan un documento al tratado conocido con el nombre de Protocolo de Kioto basado en el cambio climático ONU (1998), el cual ha propiciado la planeación de nuevos modelos de desarrollo para los países quienes son responsables del deterioro acelerado del medio ambiente, por medio de las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes del uso de combustibles fósiles y otros procesos industriales, generando dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y los clorofluorcarbonatos, producto de la inadecuada gestión de las actividades

humanas, lo cual causa un aumento desmedido de la temperatura del planeta lo que se denomina calentamiento global (Rodríguez, 2007).

Fenómenos como la sobreexplotación forestal o tala indiscriminada de árboles, la contaminación de la atmósfera y las actividades agrícolas por ejemplo son otras actividades que contribuyen al calentamiento global del planeta. En este último caso de actividades agrícolas, cerca del 25 por ciento de las emisiones de bióxido de carbono proceden del cambio de la explotación agraria, sobre todo de la deforestación en zonas tropicales, y el uso de fertilizantes como origen principal de los óxidos nitrosos producidos por el hombre (FAO, 2013).

Los sistemas que facilitan la planificación y gestión del desarrollo sostenible exigen el análisis y tratamiento de grandes volúmenes de información geográfica, necesarios para conocer no solo los recursos existentes sino también su ubicación, distribución y las relaciones espaciales que existen o pudieran existir entre ellos, permitiendo tomar decisiones adecuadas de planeación sobre las actividades llevadas a cabo por el hombre sobre el suelo para su desarrollo.

El análisis y gestión antes de la toma de decisiones que actualmente demandan los gobiernos, se debe organizar en un contexto de sistemas de información que integren la rentabilidad económica con el medio ambiente, de manera que exista una distribución equitativa de los recursos a fin de mantener un equilibrio entre los aspectos económico, ecológico y social que garanticen su conservación como medio de subsistencia desde el punto de vista de la sustentabilidad. Dada la cantidad de información de tipo gráfica y alfanumérica que se maneja por parte de un Estado, es necesario compartir la información geográfica debido a su importancia y capacidad de almacenamiento de datos que poseen, lo cual requiere desde el punto de vista de la gestión territorial que los organismos trabajen bajo lineamientos y normas comunes de manera que sea posible amortizar los recursos invertidos desde un punto de vista técnico donde se reutilicen los datos, tratándose en estos casos de un fin común como la sustentabilidad para el bienestar social. El hecho de difundir la información constituye una fuente de riqueza y generación de planeamiento de actividades

para la economía y desarrollo de un país, así como para la generación de conocimiento (Bernabe-Poveda y López-Vázquez, 2012).

Sin embargo, el uso extensivo de los sistemas de información geográfica para la planificación y gestión ambiental, así como en otras disciplinas se ve limitado por el costo de obtener información con una adecuada resolución temporal, dificultando la posibilidad de compartir información de máxima actualidad. Según Olivia y Quesada (2006) las dificultades para compartir datos e información geográfica se debe en cierta forma a:

1. La dificultad en la identificación y localización de datos referenciables espacialmente.
2. La necesidad de disponer de datos espaciales básicos o de referencia.
3. Problemas de integración en un SIG de los datos extraídos de otro sistema informático (formatos de intercambio).
4. Desconocimiento de la calidad de los datos geográficos a compartir.
5. Variabilidad en la escala.
6. Presencia de distintos proveedores con productos similares.
7. Ausencia de estándares de intercambio por parte de algunos gobiernos regionales y locales.

Estos problemas o limitaciones suponen en muchas ocasiones cierta desconfianza a la hora de compartir información.

Dado el papel fundamental de la información geográfica a nivel mundial y la manera de cómo ha influido sobre las decisiones políticas para el desarrollo, comienzan a gestionarse ciertos elementos y/o herramientas, tanto político-administrativas como técnicas cuyo objetivo principal es disminuir las dificultades que se presentan a la hora de compartir la información geográfica al momento de publicar los datos, de manera que dicha información esté disponible a todos los usuarios. Ante estos hechos se da la necesidad de instaurar un sistema para la gestión integral de información geográfica, por lo

que estos elementos en conjunto forman la figura de la IDE, instrumento mediante el cual es posible solventar estas limitaciones (Olaya 2014).

Uno de los principios comunes en el concepto IDE es el de facilitar el acceso a la información geográfica haciendo uso de un conjunto de estándares, protocolos y especificaciones. Basado en este principio, son varias las definiciones encontradas en esta temática, siendo la primera la desarrollada por el U.S. National Research Council en 1993 el cual hace referencia a un marco de tecnologías, políticas y disposiciones institucionales que, trabajando conjuntamente, facilitan la creación, el intercambio y el uso de los datos geoespaciales y recursos de información relacionados con el intercambio de información, mediante una comunidad de usuarios potenciales (Maguire y Longley 2005).

Según el Consejo Superior Geográfico del Ministerio de Fomento de España, (CSG, 2017), una IDE es un sistema informático integrado por un conjunto de recursos como: catalogo, servidores, programas, datos, aplicaciones, web mapping, etc., destinados a gestionar información geográfica disponible en la red, a través de una serie de condiciones de interoperabilidad (normas, especificaciones y protocolos) de manera que se pueda combinar la información procedente de diversas fuentes en un único sistema de información según las necesidades de cada usuario.

Una definición de IDE más general es la propuesta por el Secretariado de Geocnexiones de Canadá, el cual la define como “un mecanismo integrado en línea para entregar datos geoespaciales georreferenciados, servicios e información para aplicaciones, mejores negocios y apoyo a toma de decisiones políticas y ciertas actividades de valor agregado” (Nichols and Coleman 1999). El secretariado, también la define desde el punto de vista tecnológico, como “la tecnología, las normas, los sistemas de acceso y los protocolos necesarios para armonizar las bases de datos geoespaciales y hacerlas disponibles desde internet.

Por otra parte el Consejo Nacional de Investigacion (National States Geographic Information Council, 2009) de Estados Unidos de América, define

la IDE como “el medio para ensamblar información geográfica que describe el arreglo y tributos de rasgos y fenómenos de la tierra”. Otras definiciones son las propuestas por Chan et al., (2001), quienes muestran una tabla resumida de definiciones y sus respectiva fuente. Sin embargo, estas definiciones surgen a partir de visiones de alcance nacional, extendiéndose a ámbito estatal, regional y global, las cuales contienen aspectos fundamentales como la información geográfica con que se trabaja y un conjunto de componentes comunes como las normas, especificaciones, protocolos, servicios, bases de datos, entre otros, que participan de manera conjunta para que una IDE cobre sentido.

El uso de datos geoespaciales ha ido aumentando considerablemente con el paso del tiempo, dando lugar a nuevos planteamientos para mejorar la productividad de los datos Nebert (2001). De este modo, una IDE además de los datos y atributos geográficos, debe considerar los datos sobre los datos o metadatos, mecanismos para descubrir, visualizar y valorar los datos como catálogos de datos, y canales de difusión como internet para garantizar acceso a la información cartográfica de red, es decir, sitios que permiten la visualización y descarga de mapas estáticos. Asimismo, debe ofrecer servicios a modo de software que permitan gestionar cierta cantidad de datos, siendo necesario acuerdos organizativos para gestionar los datos en sus diferentes escalas.

Ante este escenario se han establecido acuerdos entre distintas organizaciones de carácter público y privado, con objeto de posibilitar la coordinación y administración a escala regional, nacional e internacional de la información geográfica. Unos de los elementos claves que ha facilitado la rápida extensión de las IDEs ha sido la aparición de los sistemas abiertos, los cuales favorecen la interoperabilidad entre sistemas, qué mediante protocolos e interfaces estandarizadas permiten acceder a los datos en remoto e intercambiar todo tipo de información espacial relacionada con la superficie de la Tierra, y sus entidades o elementos que sobre ella se encuentren, siendo posible generar aplicaciones integrales capaces de manejar la información de forma cooperativa (Percivall, 2002).

En este contexto, el desarrollo de las especificaciones OGC (OGC, 2011) y los estándares de la familia ISO 19100 aplicables a la información geográfica han contribuido con la implementación de las IDE, desde el punto de vista de su normatividad (IPGH, 2013). La filosofía de compartir datos y recursos geográficos a través de Internet es fundamental desde el punto de vista funcional ya que las IDEs en principio conllevan a la democratización de la información geográfica, lo que significa que usuarios especializados o no, puedan hacer uso de la información geográfica en la web sin que ello requiera de equipos especializados.

Las IDE son la consecuencia de aplicar los principios y la filosofía de la globalización a la información geográfica, incluyendo una nueva ética y nuevos modelos de negocio que se resumen en una sola frase: “si compartes, siempre ganas más” (Bernabé-Poveda y López-Vázquez, 2012). Por tanto, al publicar información geográfica a través de un servicio web, cualquier usuario puede visualizarla en pantalla. Siendo en algunos caso complicado el acceso de manera adecuada a la información, ya que las dificultades que se presentan al momento de compartir datos geográficos aparecen principalmente debido al tipo de formato y modelos de datos empleados, así como las políticas de uso, entre otros. Por ello, resulta necesario trabajar en un marco común basado en especificaciones y políticas establecidas por los organismos internacionales como OGC e ISO.

Un modelo constituye una representación simplificada y reducida de la realidad (Domingos, *et al.*, 2014). En términos geográficos, se considera una realidad compleja, integrada por elementos de distintas características de forma, tamaño, etc., de donde pueden diferenciarse varios modelos para una misma realidad geografía con tan solo tener presente algunos aspectos. Por tanto, los modelos de datos, aunque son distintos modelizan los elementos geográficos de forma similar, persiguiendo criterios homogéneos de interoperabilidad semántica entre los datos (Manson & Jardel, 2009). Por ejemplo, en el caso de la República Bolivariana de Venezuela es posible encontrar sistemas que gestionen ciertos elementos del terreno como ríos, canales, lagos, charcas, embalses, albuferas y acuíferos, y otros contemplan cursos de agua, láminas

de agua, reservorios de aguas subterráneas, etc. Determinar si esas categorías son equivalentes o si una influye sobre otra no es tarea fácil en el mapeo de modelos de datos.

Por otra parte, en países desarrollados este tipo de problemas se han ido solucionando desde iniciativas globales de normalización y estandarización. Por ello, en el año 1989 se creó la Comisión de Normas para la Transferencia de Datos Espaciales en el seno de la Asociación Cartográfica Internacional. En 1991, en el comité Europeo de Normalización se creó el Comité Técnico CEN/TC 287. Tres años más tarde, en 1994, ISO creó el Comité sobre Geomática e Información Geográfica ISO/TC211. Estas iniciativas han contribuido con la promoción del uso de formatos estandarizados para el intercambio de información geográfica, los cuales se hacen necesarios poder implementarlos en países en vías de desarrollo. Sin embargo se está imponiendo otra forma de trabajar con los datos, el cual es a través del uso de servicios web en remoto que no requieren necesariamente del intercambio de datos y en cuya área se encuentran las especificaciones OGC (Ariza y Rodríguez, 2008).

En cuanto a las limitaciones de las políticas de datos, es de hacer notar que los procesos para generar información geográfica requieren de altas inversiones económicas, de un gran esfuerzo y dedicación al momento de procesar la información ya que en ocasiones se encuentra desactualizada, no siendo adecuada y válida para promover el desarrollo económico y mejorar la gestión de los recursos naturales. Razones por las cuales se crea en 1994 de Orden Ejecutiva 12.906 la Infraestructura Nacional de Datos Espaciales de Estados Unidos (NSDI), cuya finalidad fue crear un sistema que permitiera compartir la información geográfica disponible en las diferentes instituciones del país, aparecieron de forma simultánea otras iniciativas globales, regionales, nacionales y locales que apoyaron la filosofía de compartir datos geográficos (Clinton, 1994).

La puesta en marcha de una infraestructura de datos permite que organizaciones, instituciones e incluso países desarrollados o en vías de

desarrollo puedan compartir fácilmente los datos accediendo a la información geográfica más actualizada. Por tanto, basándonos en las definiciones de IDE anteriormente mencionadas, se puede decir que una IDE para que sea eficazmente funcional requiere de ciertos componentes o elementos, los cuales de acuerdo con la clasificación establecida por Bernabé-Poveda y López-Vázquez, (2012), constituyen la columna vertebral de su estructura. Entre ellos se encuentran el componente político, tecnológico, geográfico y social, no siendo menos importantes otros elementos como el hardware, el software, y el esquema organizativo. Todos estos elementos o componentes sientan las bases para trabajar en un marco común normalizado, con lo cual se garantiza el acceso a la información.

La administración pública como ente rector del país tiene la responsabilidad de promover, regular y crear las políticas públicas necesarias para el buen entendimiento por parte de los ciudadanos. Considerando el objetivo de las IDE, de que todos puedan acceder a la información, basada en sus políticas e iniciativas colaborativas, con aportaciones de un amplio conjunto de actores del sector público y otros actores, como empresas privadas, universidades y ciudadanos. Está respaldado por un marco legal, con un mínimo de reglas que definen ciertas responsabilidades básicas. En definitiva, el marco legal establece las competencias, el régimen jurídico, los requisitos de colaboración entre organismos públicos y privados y la política de datos general en el ámbito de la cartografía e información geográfica de todos los actores implicados (Bernabé-Poveda y López-Vázquez, 2012).

En el componente tecnológico debe establecer los estándares y normas requeridas para que los sistemas y servicios sean interoperables, coordinando el conjunto de herramientas y mecanismos informáticos para que la red sea operativa y en consecuencia se pueda buscar, consultar, acceder, ordenar y usar datos geográficos. En este sentido, se utiliza la arquitectura cliente-servidor (Figura 2) en la que los clientes hacen peticiones a una serie de servicios de un servidor, los cuales almacenan y procesan las peticiones realizadas por los usuarios de acuerdo al protocolo Hypertext Transfer Protocol

(HTTP) y en consecuencia devuelven la respuesta a través de etiquetas de una página web.

La estructura de codificación de características geoespaciales en un entorno web requiere el empleo de dos esquemas del lenguajes XML (Extensible Markup Lenguaje): el esquema de características (feature.xsd) GML (Geographic Markup Language) y el esquema de Geometría GML (geometry.xsd); con estos dos esquemas simples es posible codificar una amplia variedad de información geoespacial, para el modelado, transporte y almacenamiento de información geográfica (OGC, 2007).



Figura 2. Modelo cliente-servidor (Fuente: elaboración propia).

Otro de los puntos relevantes en cuanto a la componente tecnológica son todos los aspectos relacionados con las normas y estándares requeridos para que la información geográfica fluya entre diferentes sistemas, es decir, que los datos sean legibles y comparables de manera que garanticen la interoperabilidad.

La condición para lograr tal interoperabilidad en el campo de la información geográfica conduce a la necesidad de abordar la creación y adopción de estándares, los cuales a su vez tienen como propósito (Bernabé-Poveda y López-Vázquez, 2012):

- Proporcionar una especificación semántica mediante la definición de los datos que se quieren intercambiar.
- Proporcionar formatos definidos, reduciendo la perdida de información en la conversión entre distintos formatos.
- Reducir los costes en la implementación y mantenimiento del software.
- Reducir los costes económicos al evitar duplicidades, es decir, los generadores o productores de datos deben mantener sus datos actualizados.
- Mejorar las relaciones entre las instituciones y clientes o grupos de usuarios.

Dentro del proceso de estandarización según los autores se siguen dos vías o categorías de actuaciones; los procesos formales, los cuales son desarrollados por un organismo oficial legalmente aceptado como por ejemplo ISO, CEN, AENOR, etc., y los procesos más prácticos, los cuales son los desarrollados por organismos que no tienen como misión la elaboración de normas (grupos de usuarios o asociaciones de empresas privadas) sino que producen documentación sin respaldo legal. En este último caso, en el área de la información geográfica se encuentran las especificaciones de OGC. Existen otros organismos que hacen posible la legibilidad de los datos como W3C, el cual aporta ciertas especificaciones a algunos lenguajes de programación para la representación y estructura principal de los sitios web.

El componente geográfico se corresponde con el conjunto de datos empleados para la descripción geográfica de un territorio y de los eventos naturales que sobre la superficie tienen lugar, comprendiendo tanto a los datos, como a los metadatos y a los servicios generados. Los datos además juegan un papel importante en el proceso de descripción del territorio, debiendo presentar unos niveles de calidad mínimos que permitan generar una serie de servicios de confianza para su posterior publicación en Internet. Los datos geográficos que utilizan las IDEs, atendiendo al tipo de información que representan, se clasifican en datos de referencia y datos temáticos. En el primero de los casos,

se entiende por datos de referencia, a aquellos datos georreferenciados fundamentales que sirven de guía o base para construir o referenciar cualquier otro dato fundamental o temático. Constituyen el marco de referencia que proporciona el contexto geográfico a cualquier aplicación, es decir, hacen referencia a la posición dentro de un sistema de referencia de coordenadas establecido y cumplen la misma función que una cartografía básica (Martínez-de-Antoñana, 2008). En segundo lugar, los datos temáticos son aquellos propios de aplicaciones específicas que explotan la información geográfica con un propósito determinado. La naturaleza de algún fenómeno dado y sus características particulares, quedan establecidas por esta componente. Este tipo de datos se apoyan en los datos de referencia para completar su significado. Por tanto, los datos temáticos incluyen valores cualitativos y cuantitativos que se corresponden con atributos asociados a los datos de referencia (Bernabé-Poveda y López-Vázquez, 2012).

En el desarrollo de un proyecto IDE hay que tener en cuenta la componente social, interviniendo distintos grupos de personas con diferentes funciones y distintos procesos. A cada tipología, diferenciada por sus funciones y procesos en el proyecto, se les llamará personal, entendiendo como tal a cualquier persona y/o institución con una función bien definida para su desarrollo. En este sentido, para que un proyecto IDE logre su éxito ampliamente es necesario la participación y compromiso de un conjunto de usuarios o actores, entre los que se encuentra según Olaya (2014):

- a) Usuario nivel básico; que utiliza herramientas básicas de un SIG
- b) Usuario avanzado; que utiliza herramientas y funcionalidades específicas, unas veces no disponibles para el público en general, ya sea en la web o en un SIG de escritorio.
- c) Usuarios de negocio los cuales acceden a los datos proporcionados por una IDE desde diversas aplicaciones, combinándolos con otras fuente de datos y generando un nuevo producto el cual es negociado.

- d) Usuario consultivo; como aquel que accede a los datos restringidos mediante alguna autorización específica.
- e) Usuarios editores, gestores y administradores, donde cada uno realiza como su nombre indica una función particular consistente en editar, gestionar y administrar los datos de una IDE.

Entre otros de los actores involucrados en un proyecto IDE, son los mismos organismos internacionales de creación de estándares como ISO, OGC, y W3C, los cuales desarrollan las normas que forman la base tecnológica de una IDE, garantizando su interoperabilidad.

También se encuentran los productores de datos, agrupados en organismos de administraciones públicas y privadas que se encargan de generar datos, y los proveedores de servicio, que son las organizaciones que asumen su implementación, producción y mantenimiento del sitio web. Por otra parte, están los desarrolladores o creadores de software, el cual pueden formar parte de este grupo usuarios, universidades y las organizaciones, quienes tienen la misión de generar los programas y aplicaciones necesarios que permiten publicar un servicio o implementar un Geoportal desde el que puedan visualizarse, consultarse y utilizarse los datos.

2.3.1.1 Metadatos.

Los metadatos, que describen o documentan a los propios datos espaciales digitales, aportando información adicional acerca de ellos, constituyen uno de los pilares fundamentales de una IDE, así como los servicios que ésta ofrece a través de los metadatos de servicios. En general, un grupo de metadatos se refiere a un grupo de datos, llamado recurso. Sin embargo, éstos no tienen una definición única. Según Steinacker (2001), son descripciones estructuradas y opcionales que están disponibles de forma pública para ayudar a localizar objetos o datos estructurados y codificados que describan características de instancias para ayudar a identificar, descubrir, valorar y administrar la información descrita, esto supone una descripción estandarizada de las características de un conjunto de datos. Los recursos de metadatos, permiten

al usuario entender el contenido de los datos a los que está accediendo, sus posibilidades y limitaciones, es decir, lo que representan y como lo representan.

Los metadatos de datos describen aspectos como la fecha de los datos, el título o nombre del recurso, el contenido, la extensión que cubren, el sistema de referencia espacial, el modelo de representación espacial de los datos, su distribución, restricciones de seguridad y legales, frecuencia de actualización, calidad, etc (FGDC, 2011). Los metadatos no son exclusivos de los datos digitales, por ejemplo un mapa también contienen metadatos de cierta forma, como es el caso de la leyenda o fecha de su creación. Mientras que en los datos geográficos digitales, los metadatos no forman parte del dato directamente sino que son independientes de este, es decir, forman parte de un documento adicional, integrándose de las siguientes maneras; insertando los metadatos dentro del propio documento, embebidos y codificados en la cabecera del documento, asociando los metadatos por medio de archivos acoplados a los recursos a los que describen o independientes, en un fichero separado, generalmente una base de datos soportada por una organización (Martínez-de-Antoñana, 2008).

Se entiende por metadatos de servicios, a aquellos datos que describen las características del servicio. En este caso, un servicio de una organización en su registro de metadatos incluye información como su dirección URL a modo de localizador uniforme de recursos, la organización que proporciona la información o el ámbito espacial que cubre. Se entiende como servicio web al proceso de ejecutar una aplicación en un servidor accesible desde Internet el cual al momento de recibir una petición responde con la respuesta solicitada. Si el formato de la petición y de respuesta está estandarizado, el proceso es sencillo para integrar los datos en una misma aplicación. Siendo necesario indicar en la petición una serie de parámetros de entrada.

Un proyecto IDE puede ser desarrollado para ofrecer servicios basados en la publicación de coberturas, fenómenos, raster o catálogos entre otros (Nebert, et al., 2007). De entre todos ellos, uno de los pilares fundamentales en el que

se sustenta una IDE es el servicio de catálogo para la web como CSW (catalogue web service). El principal objetivo de un servicio CSW es permitir que los usuarios puedan localizar datos y servicios geográficos, empleando cualquiera de las operaciones que describen su interfaz a través de la consulta de metadatos y la selección de metadatos almacenados en diferentes servidores (Bernabé-Poveda, y López-Vázquez, 2012). No obstante, para que los catálogos sean intercambiables y puedan admitir búsquedas distribuidas se hace necesario disponer de registros de metadatos que cumplan con determinadas normas y estándar.

Entre los principales objetivos que se persiguen con la creación de metadatos, se encuentran los que permiten la búsqueda del conjuntos de datos: saber qué datos existen y su disponibilidad para una zona determinada sobre un tema determinado y a una escala adecuada, la selección del conjunto de datos comparan diferentes conjuntos de datos unos de otros, de modo que se pueda seleccionar aquellos que cumplen con los requisitos establecidos por el usuario, la utilización del conjunto de datos, describiendo las características técnicas de los datos de manera objetiva, amplia y completa, a fin de permitir su explotación eficaz.

Según Pons (2009), la definición que se tenía sobre los metadatos ha evolucionado a lo largo del tiempo desde la primera definición establecida por la norma ISO 19115: 2003, en la que se definen los metadatos como “datos acerca de los datos”, hasta definiciones más actuales que los tratan como “datos acerca de datos y servicios”, ampliando la concepción a recursos, englobando cualquier fuente de información.

Las normas y estándares de metadatos son el producto de la experiencia y el consenso entre muchos países, que a su vez han sido desarrolladas y revisadas por un grupo internacional de expertos con amplia diversidad cultural y social. Tal y como establece Olaya (2014), un estándar es un documento o práctica que busca armonizar los aspectos técnicos de un producto o servicio, y se considera como tal, cuando un grupo o una comunidad lo aprueban para definir las características de esos productos o servicios al momento que lo

gestionan. Dentro de la familia de normas ISO, el comité técnico 211 elaboró la norma ISO 19115:2014 Geographic Information Metadata. Esta norma tiene por objeto definir cada uno de los elementos que conforman los metadatos. El conjunto total de elementos que componen los metadatos ascendió a 138 con la versión extendida de ISO 19115-2, pudiendo ser estos elementos de tipo obligatorio, opcional u obligatorio.

Ante esta situación, uno de los problemas presentados fue la dificultad para intercambiar metadatos provenientes de distintas herramientas, ya que no se contaba para el momento con ninguna estructura de almacenamiento estándar. A consecuencia de ello se desarrolla la ISO 19139:2007 “Geographic information -- Metadata -- XML schema implementation” la cual proporciona un método para volcar el contenido de los metadatos de acuerdo a ISO 19115 en formato XML (ISO/TC 211, 2009).

Dado el gran número de elementos desarrollado en ISO 19115 es posible implementar perfiles de metadatos que permitan agilizar la elaboración de éstos. Estos perfiles tienen que recoger todos los elementos obligatorios recogidos en ISO, apareciendo los elementos opcionales u obligatorios a elección de la institución que los desarrolla. En este sentido, países como España han desarrollado una implementación de un perfil denominado Núcleo Español de Metadatos (NEM), el cual comprende un conjunto mínimo de elementos de metadatos recomendados para su utilización a la hora de describir recursos relacionados con la información geográfica (Rodríguez, 2008 y Maganto, *et al.*, 2014).

La norma ISO 19115 establece un modelo generalizado de metadatos de información geográfica con un grupo común de terminologías, definiciones y procedimientos de ampliación para metadatos, los cuales han sido adoptados por CEN/TC287 (Comité Técnico Europeo de Normalización) como norma Europea. Concretamente en España por AEN/CTN148 (Comité Técnico de la Asociación Española de Normalización) de información geográfica, por lo que se encuentra disponible en español, con la identificación: UNE-EN ISO19115 (Martínez-de-Antoñana, 2008).

Los metadatos pueden ser creados en el mismo origen de los datos, recogiendo la información al mismo tiempo que se producen los datos en sí. Sin embargo, la creación de metadatos deben tener en cuenta los siguientes tipos de elementos (Rodríguez, 2008):

- Informar sobre los datos; informando de las características básicas que identifican y describen los datos como son título, resumen descriptivo, extensión espacial y temporal, sistema de referencia y representación espacial entre otros.
- Informar sobre la adquisición de los datos; aportando información sobre la metodología para la adquisición de los datos, del instrumental utilizado y su plataforma, fecha y requisitos para la adquisición.
- Informar del contenido; describiendo información sobre la cobertura (atributos y valor de las celdas), las imágenes (iluminación, calidad, cantidad de compresión, calibración de la cámara, etc.), dimensión del rango medido en las celdillas e información de las distintas bandas espectrales.
- Informar de cómo se distribuyen los datos; aportando datos sobre el contacto para obtener una copia del conjunto de datos, formatos de almacenamiento, precios, etc.
- Calidad de los datos; detallando las fuentes de datos utilizadas y los pasos del proceso realizado para la obtención del producto final.
- Información de los metadatos; informando con carácter general sobre el metadato que se está creando aportando identificador, idioma, nombre de la norma, fecha o persona responsable de su creación o los recurso.

El Servicios de metadatos puede aumentar considerablemente el grado de disponibilidad y/o utilidad del conjunto de datos mediante la puesta en funcionamiento de un servicio web que logre publicar la información geográfica con una interfaz estándar. Sin embargo, la calidad de contenido de los

metadatos es la clave para una efectiva publicación dentro de una IDE, garantizando la confianza del contenido del sitio web (Tait, 2005).

La Figura 3 muestra un cliente web interesado en localizar una determinada información geográfica, utilizando para ello una interfaz de usuario para la búsqueda hace una solicitud de búsqueda. La petición de búsqueda llega al Gateway o portal de acceso al catálogo y éste formula nuevamente la pregunta a uno o varios servidores de catálogo registrados. Una vez hallado el servidor de catálogo, éste gestiona una colección de entradas de metadatos. Dentro de las entradas de metadatos aparecen instrucciones sobre cómo llegar al conjunto de datos espaciales que se han descrito o que se desea obtener, siendo posible tener acceso al servicio web mapping para crear mapas de interés activando o desactivando capas de información. Finalmente la solicitud de la petición es atendida devolviendo como respuesta la capa o el conjunto de capas solicitadas, mediante la visualización en pantalla.

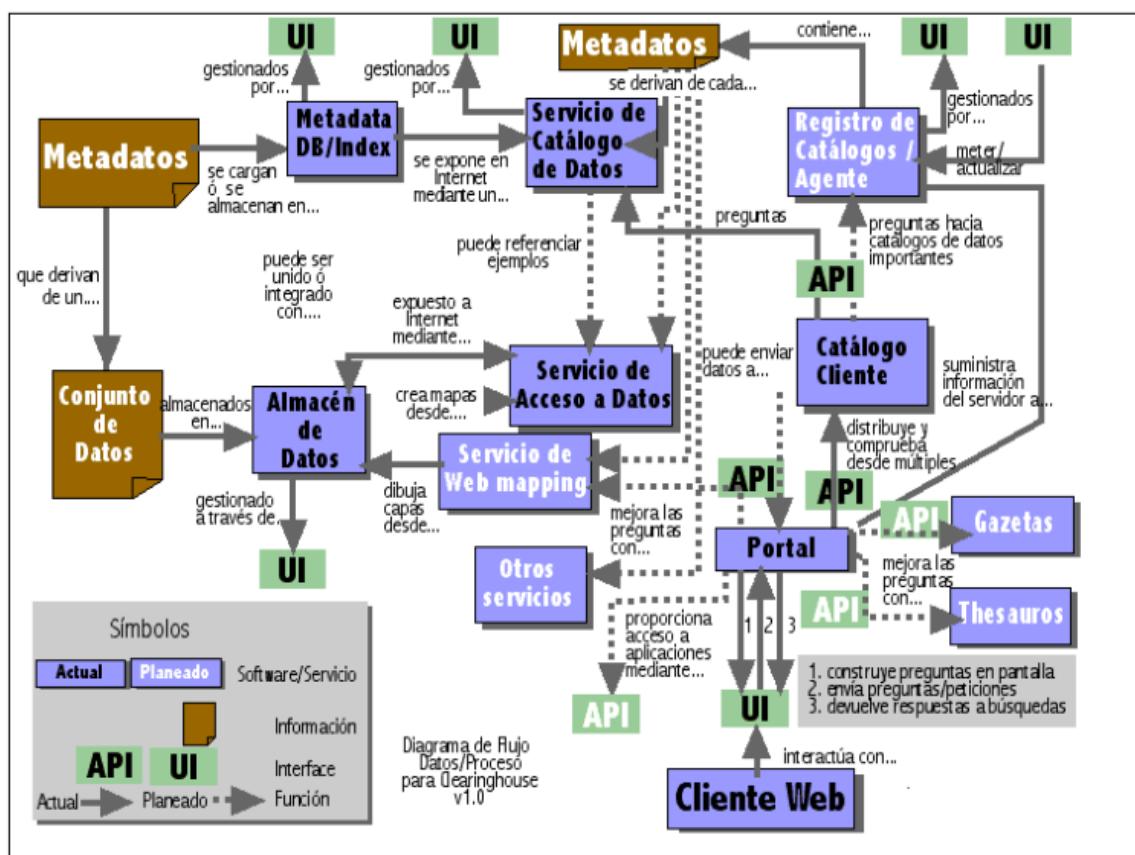


Figura 3. Esquema del servicio de acceso a datos geoespaciales (Fuente; McLeod, 2001)

La creación del catálogo de metadatos puede realizarse tanto con herramientas open source como privativas. En el primero de los casos cabe destacar CatMDEdit; herramienta Open Source desarrollado por el grupo de sistemas informáticos (IAAA) de la Universidad de Zaragoza y GeoSpatiumLab S.L., apoyada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España. Esta herramienta facilita la documentación de recursos, con especial atención en la descripción de la información geográfica, es multiplataforma y multilingüe, permite la importación y exportación de metadatos, es decir, crea los metadatos basándose en la norma ISO 19.115, 19.119 y 19.538 (Dublin Core).

GeoNetwork, aplicación Open Source desarrollada por la FAO, es otra herramienta de catálogo de metadatos geográficos basada en web. Ésta integra la creación y administración de metadatos; búsqueda de metadatos; publicación y distribución de datos, es decir, proporciona la edición de metadatos, los servicios y las funciones de búsqueda, basado en las normas ISO 19.115/19.139, ISO 19.115-3, CSW 2.0, y OGC. Por otro lado, TerraCatalog, basada también en software libre, es una herramienta para el mantenimiento de metadatos, permitiendo la captura y la creación de metadatos para distintas geoaplicaciones.

Entre las herramientas privativas para la creación de metadatos destaca ArcCatalog, desarrollado por la compañía ESRI. Soporta CSDGM (Content Standard for Digital Geospatial Metadata) e ISO 19.115. Los metadatos son almacenados como archivos XML junto con la colección de los datos. Una de las funcionalidades principales a destacar de esta utilidad es la sincronización con los cambios realizados en los datos.

2.3.1.2 Servicios IDE.

Las IDEs se basan en una arquitectura orientada a servicios. La norma ISO 19.119:2005 define un servicio, como la parte diferenciable de la funcionalidad proporcionada por una entidad a través de una interfaz. Por tanto, un servicio IDE se corresponde con las funcionalidades disponibles en la web, y que a su vez permiten el acceso a datos mediante un navegador de internet o cliente

ligero (Figura 4). Asimismo algunos de estos servicios también son accesibles desde clientes pesados (Figura 5), es decir, desde un software SIG de escritorio (Rodríguez, *et al.*, 2006).

Todas estas funcionalidades están organizadas en servicios de visualización de mapas, consultas, análisis, descargas, etc. La forma de hacerlos públicos de manera clara y ordenada es a través de servicios de Catálogo, los cuales soportan la localización tras la búsqueda y dan acceso a la información tal y como lo establece OGC. Estos servicios de catálogo brindan acceso directo a datos espaciales y a otros servicios adicionales a diferentes usuarios, además permiten descubrir, valorar y usar los datos para solucionar problemas o apoyar en la toma de decisiones (Bernabé-Poveda, y López-Vázquez, 2012).

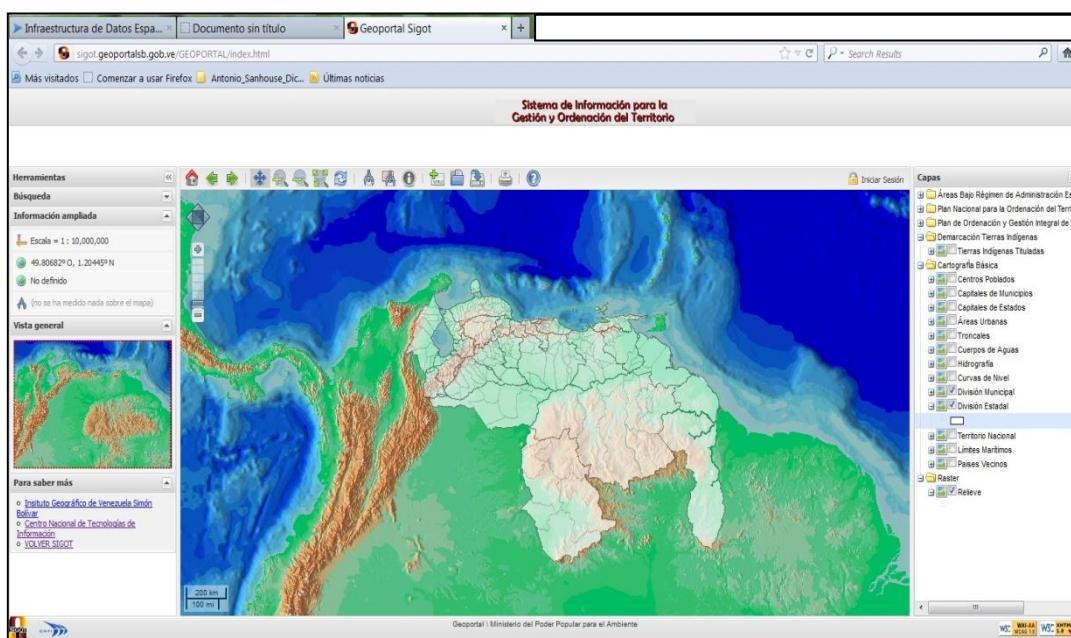


Figura 4. Acceso a servicios IDE desde un cliente ligero vía Web (Fuente: elaboración propia).

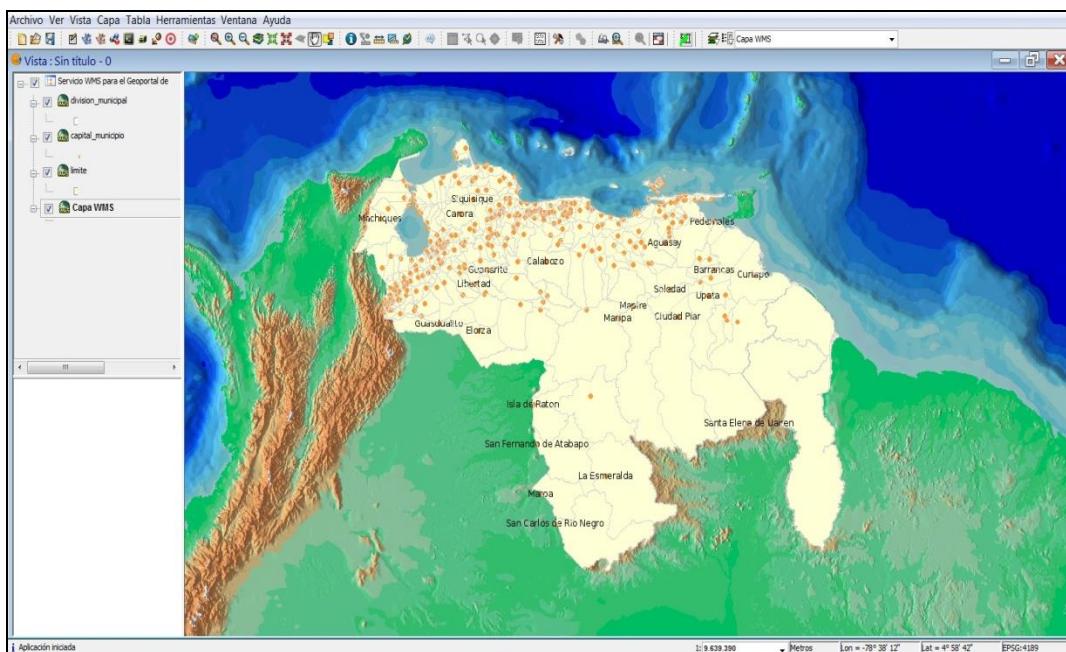


Figura 5. Acceso a servicios IDE desde un cliente pesado, gvSIG (Fuente: elaboración propia).

En un proyecto IDE es posible implementar distintos tipos de servicios como: catálogo, de mapa, de fenómenos, de coberturas, de contenidos de mapas, de nomenclátor, de descripción de estilos de capas y de procesamiento Web.

2.3.1.2.1 Servicio de catálogo web CSW.

OGC lo define como aquel que proporciona capacidades de búsqueda e invocación sobre los recursos registrados dentro de una IDE. Éste permite la publicación y búsqueda de metadatos que describen a los datos, servicios, aplicaciones y en general a todo tipo de recursos. Permitiendo también la búsqueda de conjuntos de datos geográficos disponibles a una escala determinada, de una zona particular, sobre un tema específico, y en una fecha o intervalo de fechas (Nebert *et al.*, 2007). El resultado de la búsqueda se puede ofrecer en distintos formatos, lo cual permite configuraciones como:

- a. Visualizar o descargar un documento de metadatos describiendo las características principales del recurso encontrado y visualizar las características de las unidades que componen una serie cartográfica encontrada en una búsqueda.

- b. Visualizar el producto localizado en el visor en el caso de existir un servicio de mapas disponible.

La Figura 6 muestra un diagrama UML de casos de uso con las interacciones básicas de un usuario u organización involucrados en la localización de datos espaciales. Los cuadros son componentes identificables del servicio de catálogo distribuido y las líneas que conectan los cuadros ilustran un conjunto específico de interacciones descrito por el texto junto a la línea. El usuario, a través de la interfaz del catálogo de entrada, realiza y ejecuta una petición, la cual es redireccionada al directorio de servidores para su búsqueda. A través de los servidores de catálogos, se accede a los metadatos y estos devuelven la respuesta específica en forma de datos de información de repositorios de datos espaciales.

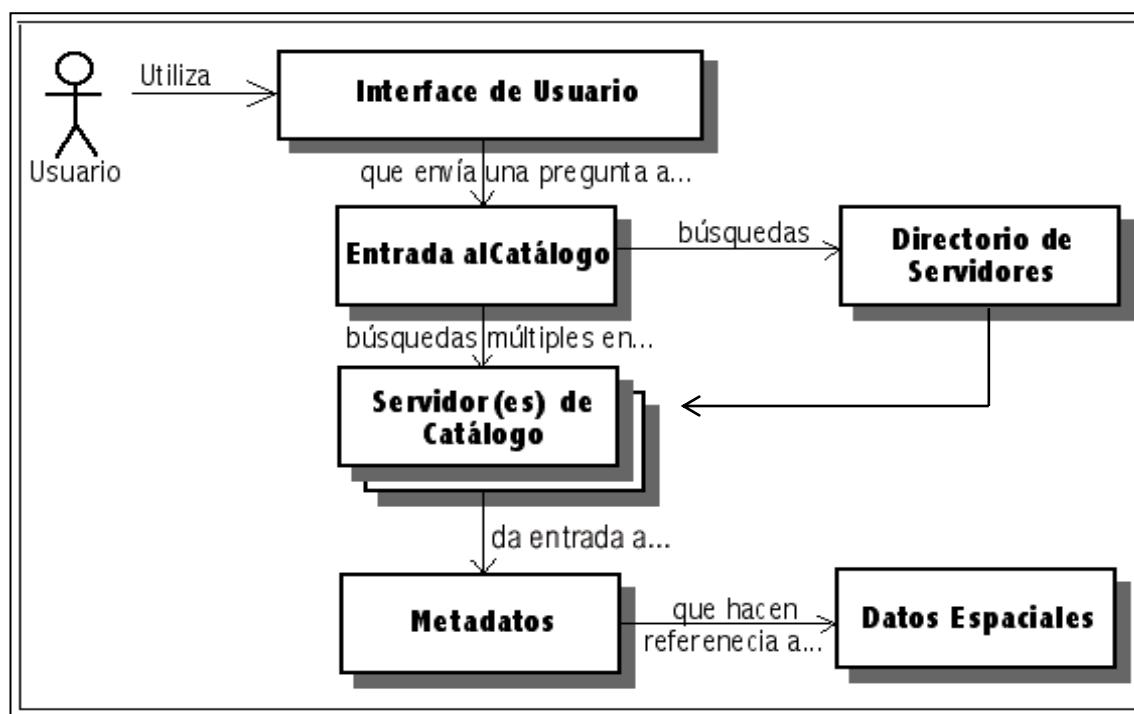


Figura 6. Interacción básica de un usuario u organización y los datos espaciales
(Fuente: Nebert, 2001).

2.3.1.2.2 Servicio de visualización de mapas e imágenes Web, WMS

Se refiere al servicio diseñado con el propósito de facilitar la visualización de la información geográfica, proporcionando una representación o una imagen del

mundo real de un área determinada. Este estándar, definido por OGC, dispone de distintas versiones de la especificación de este servicio, el cual es implementado por muchos programas tanto comerciales como libres. Dicha representación de la información espacial puede proceder tanto de información de naturaleza vectorial como raster. Su funcionamiento se basa en realizar una petición, la cual es procesada por el servidor de mapas WMS que devuelve al usuario una imagen en formato JPEG, GIF o PNG entre otros (Figura 7). La definición de un formato u otro garantiza la transparencia de las capas de información, permitiendo la combinación de capas procedentes de diversos servicios web.

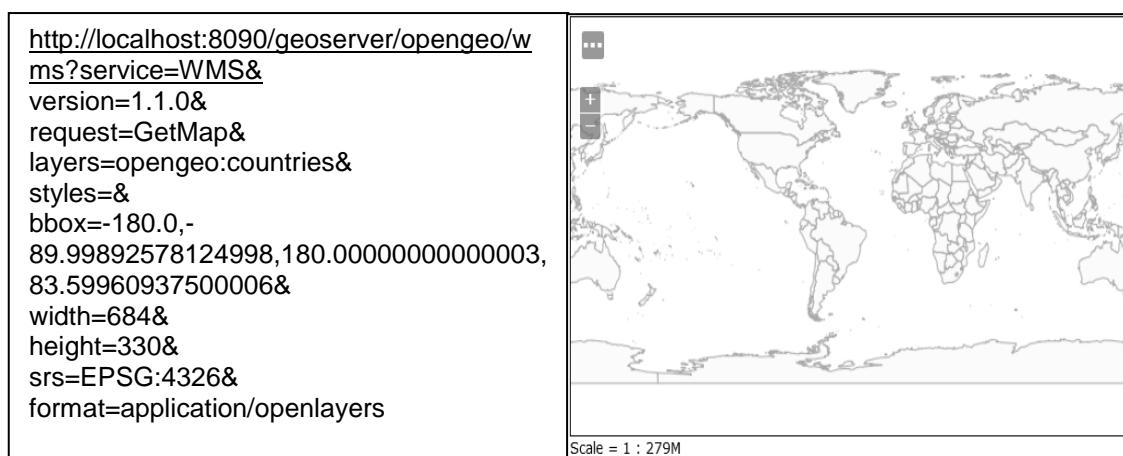


Figura 7. Consulta WMS, Getmap y su resultado (Fuente. Elaboración Propia).

Este tipo de servicio ha sido adoptado por ISO para facilitar el intercambio de información geográfica en Internet, asimismo forma parte de uno de los tres servicios fundamentales que debe existir en una IDE. Este estándar además permite compartir información geográfica alojada en servidores remotos, con el objeto de poder ser utilizada tanto desde visualizadores web, como desde aplicaciones de escritorio (Martínez-de-Antoñana, 2008). El servicio se encuentra organizado en una o más capas de información, que pueden visualizarse u ocultarse una a una o de manera dinámica en función de la escala, alejándose o acercándose del área de interés. También es posible establecer distintos tipos de mapas temáticos por capa, en función de las categorías asociadas a campos de atributos.

Un servicio WMS básico debe cumplir con al menos dos operaciones, *GetCapabilities* y *GetMap*. La primera ofrece información sobre el mapa e informa de modo resumido sobre las capas que ofrece el servicio, mientras la segunda devuelve el propio mapa.

Un servicio WMS más avanzado permite, mediante la operación *GetFeatureInfo* devolver información sobre elementos de un mapa, es decir, permite la recuperación de información alfanumérica (Figura 8) asociada a elementos de una capa concreta, siempre y cuando aparezca marcada como consultable en el documento Capabilities (De la Beaujardiere, 2006).

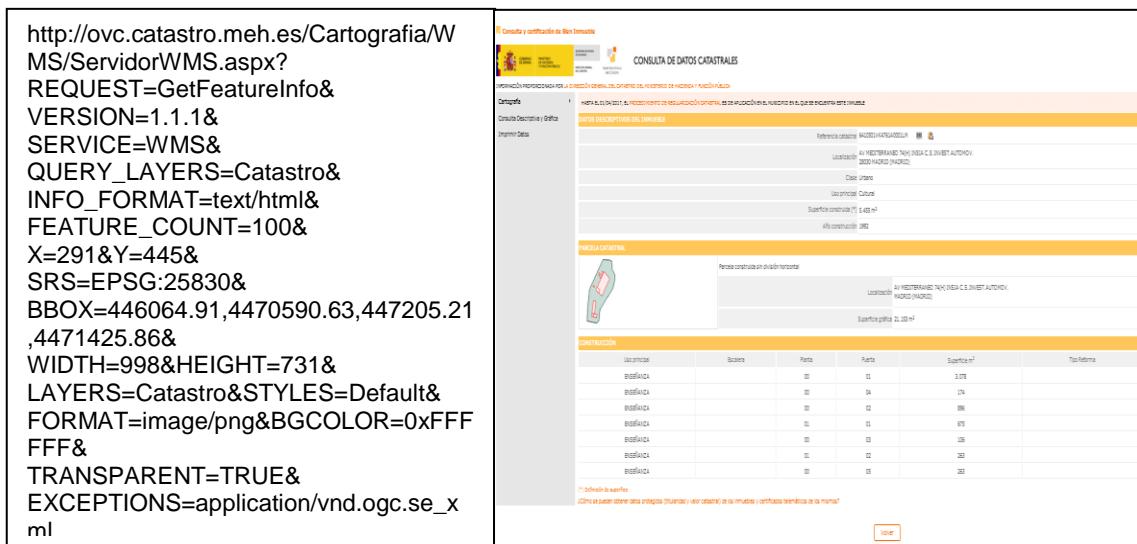


Figura 8. Consulta WMS, GetFeatureInfo y su resultado (Fuente. Elaboración Propia).

2.3.1.2.3 Servicio de fenómenos o características de entidades web, WFS

Este servicio ofrece la posibilidad de acceder y consultar todos los atributos de un fenómeno geográfico con una geometría descrita por un conjunto de coordenadas, es decir, debe permitir el acceso a la información geográfica discreta. Los formatos de distribución deben ser interoperables con otros sistemas, como por ejemplo el formato GML o el shapefile. Este estándar OGC establece que las interfaces para un servicio WFS deben definirse en XML, siendo recomendado usar GML para la descarga y distribución de la información sobre fenómenos y el filtro de lenguaje debe definirse en XML y derivarse de CQL (Common Query Language) tal y como se indica en el

OpenGIS Catalogue Interface Implementation Specification. También está definido por la norma ISO/DIS 19.142:2010 (ISO 19.142, 2010).

Este tipo de servicio debe permitir identificar, descargar, consultar, filtrar, bloquear y modificar (crear, actualizar y eliminar), datos geográficos en formato vectorial codificados en GML. Dependiendo de la versión del estándar, la codificación se realizará en una u otra versión del lenguaje. En resumen el OGC lo define como un servicio que proporciona los medios necesarios para acceder a la información geográfica y poder trabajar sobre ella independientemente del medio y el método que se emplee para su almacenamiento.

La Figura 9 muestra a modo de ejemplo una descripción de un servicio WFS en formato XML y la Figura 10 el resultado de visualizar un servicio WFS publicado correctamente. Asimismo es posible visualizar el servicio desde algún software SIG de escritorio sobre el cual se puede ejecutar la descarga de información geográfica.

```
Este fichero XML no parece tener ninguna información de estilo asociada. Se muestra debajo el árbol del documento.

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<wfs:WFS_Capabilities version="2.0.0" xsi:schemaLocation="http://www.opengis.net/wfs/2.0 http://localhost:8090/geoserver/schemas/wfs/2.0/wfs.xsd" updateSequence="2178">
  <ows:ServiceIdentification>
    <ows:Title>GeoServer Web Feature Service</ows:Title>
    <ows:Abstract>
      Web Feature Service implementation for vector data supporting WFS 1.0.0, WFS 1.1.0 and WFS 2.0.0. All layers published by this service are available via WMS.
    <ows:Abstract>
    <ows:Keywords>
      <ows:Keyword>WFS</ows:Keyword>
      <ows:Keyword>WMS</ows:Keyword>
      <ows:Keyword>GEO SERVER</ows:Keyword>
    </ows:Keywords>
    <ows:ServiceType>WFS</ows:ServiceType>
    <ows:ServiceTypeVersion>2.0.0</ows:ServiceTypeVersion>
    <ows:Fees>NONE</ows:Fees>
    <ows:AccessConstraints>NONE</ows:AccessConstraints>
  </ows:ServiceIdentification>
  <ows:ServiceProvider>
    <ows:ProviderName>Boundless</ows:ProviderName>
  </ows:ServiceProvider>
  <ows:ServiceContact>
    <ows:IndividualName>Boundless</ows:IndividualName>
    <ows:PositionName>Customer Support</ows:PositionName>
  </ows:ServiceContact>
  <ows:ContactInfo>
    <ows:Phone>
      <ows:Voice/>
      <ows:Facsimile/>
    </ows:Phone>
  </ows:ContactInfo>
  <ows:Address>
```

Figura 9. Consulta sobre la publicación del servicio WFS (Fuente. Elaboración Propia).

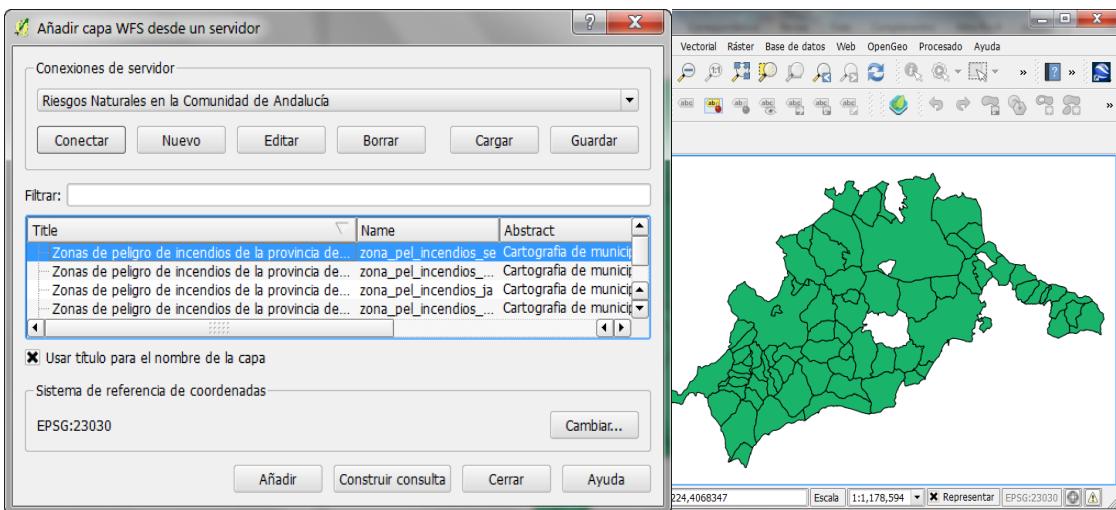


Figura 10. Consulta WFS en Software libre QGIS como cliente. Capa de la zona de peligro de riesgo de incendio de Málaga, España (Fuente. Elaboración Propia).

2.3.1.2.4 Servicio de coberturas web WCS

Este tipo de servicio distribuye la información geográfica de naturaleza raster a modo de coberturas. Es un servicio análogo al WFS para datos ráster permitiendo no solo visualizar información ráster, como lo ofrece un WMS, sino además consultar el valor del atributos o atributos almacenados en cada píxel de información (Olaya, 2014). La diferencia principal con el servicio WMS es que el servicio WCS proporciona los datos con su semántica original, lo cual permite que puedan ser interpretados, extrapolados, etc., y no sólo representados de forma estética.

En comparación con el servicio WFS, éste devuelve información relativa a fenómenos geoespaciales discretos mientras que el servicio WCS lo hace para fenómenos en un contexto de espacio-temporal continuo.

Este servicio ofrece tres operaciones: *GetCapabilities*, *DescribeCoverage*, y *GetCoverage*. La operación *GetCapabilities* devuelve un documento XML que detalla el servicio así como una breve descripción de las coberturas que los clientes soliciten. *DescribeCoverage* devuelve un documento XML con una descripción detallada de una o varias coberturas de las suministradas por el servicio. Finalmente, *GetCoverage* permite obtener una cobertura o parte de ella.

De este modo, un servicio WCS permite publicar y acceder a conjuntos de datos en formatos raster o malla, tanto individuales como a modo de colecciones o series temporales. Las áreas de aplicación (Figura 11) para este tipo de servicio son la teledetección a través de sensores remotos, la meteorología, modelos batimétricos o modelos digitales de elevación del terreno (MDE) y de superficie (MDS).

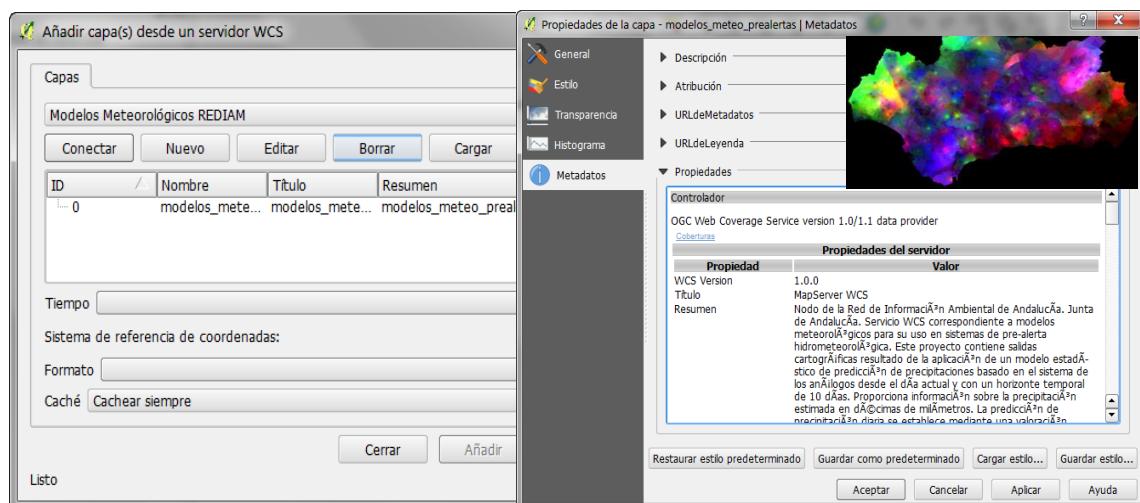


Figura 11. Consulta al servicio de cobertura WCS con el cliente QGIS. Capa de Modelo Meteorológico de Prealerta de la Provincia de Andalucía (Fuente. Elaboración Propia).

2.3.1.2.5 Servicio de contenidos de mapas web WMC

La especificación del WMC tal y como lo define OGC establece un formato estandarizado que permite almacenar todos los parámetros y características de una situación activa en un geoportal para poder reproducirla posteriormente, es decir, almacena un contexto. Un contexto recoge la información necesaria para reproducir las condiciones de una determinada sesión de uso de un cliente de tal forma que el cliente puede restablecer la conexión posteriormente. En comparación con el servicio WMS donde es necesario acceder frecuentemente a las capas de información, con el servicio WMC solamente será necesario configurar cada conexión la primera vez y luego ir guardando los parámetros en un fichero, de tal modo que el usuario tendrá una colección de conexiones preparadas para ser utilizadas en una nueva ocasión (Sonnet, 2005).

En el contexto se almacena información en formato XML las capas que forman el mapa representado por el cliente y los servidores de los que estas se obtienen, la región cubierta por el mapa, así como otro tipo de información adicional para anotar el mapa generado.

2.3.1.2.6 Servicio de nomenclátor, Gazetteer WFSG.

Para este servicio OGC ha creado un perfil de la especificación para WFS que propone metadatos, operaciones y tipos de entidades geográficas para un caso específico, siendo denominado el servicio como *Gazetteer Service*. Este servicio devuelve las descripciones completas de las entidades geográficas seleccionadas mediante la consulta de sus identificadores. El uso más común de este servicio es almacenar un catálogo de entidades del mundo real junto con los topónimos que los identifican permitiendo al usuario localizar la ubicación de la entidad a partir de su topónimo. Por tanto, este servicio devuelve las descripciones completas de las entidades geográficas seleccionadas mediante la consulta de sus identificadores. Esta consulta puede además soportar la selección de atributos de entidades como el nombre, el tipo de entidad o la localización geográfica.

Este tipo de servicio recibe como entrada un nombre y utiliza éste para localizar los fenómenos geográficos que cumplen un determinado criterio. Este criterio puede ser variable, pudiendo exigir que el nombre coincida plenamente, que comience por él, o que lo contenga, entre otras opciones.

2.3.1.2.7 Servicio de descripción de estilos de capa SLD.

Es un servicio que describe estilos de capas y permite al usuario definir estilos personalizados de simbolización de las entidades geográficas. La construcción de los estilos permite incluso crear reglas para la representación de puntos, líneas, polígonos y textos. Este servicio se considera una extensión de las capacidades de un servicio WMS, permitiendo emplear estilos de simbolización con sus propias configuraciones para representar la información geográfica a través de la web. Es otro estándar OGC en el cual se definen las características del lenguaje necesario para crear cada uno de los estilos de

simbolización que se requieran (Lupp, 2007). Las simbologías recogidas mediante un documento con extensión SLD pueden emplearse para la representación tanto de capas ráster como vectoriales. En este sentido, muchas de las herramientas SIG como gvSIG, KOSMO, etc., permiten generar archivos de estilos SLD, los cuales a la hora de publicar información geográfica en la web permiten a través del servidor hacer modificaciones sobre el o los estilos definidos de cada capa.

2.3.1.2.8 Servicio de procesamiento Web, WPS.

El estándar Web Processing Service (WPS) está enfocado a definir el marco en el que se ha de producir el servicio de procesos remotos. Este servicio proporciona el acceso a cálculos preestablecidos o a procesamientos de datos espaciales. Los datos requeridos por el servicio WPS pueden ser enviados a través de la red, o estar disponibles en el propio servidor (Mueller, 2014). Se pueden usar datos de imágenes o datos estándar de intercambio como GML.

Habilitar procesos geoespaciales en Internet requiere el desarrollo de una amplia variedad de servicios web. La especificación define la forma en que se llaman a estos procesos a fin de facilitar la aplicación y adopción de nuevos servicios. Se entiende por proceso en este contexto a todo aquel algoritmo, cálculo o modelo que opere sobre datos georreferenciados. En un servicio WPS quedan definidos tres operaciones básicas:

- *GetCapabilities*, la cual permite al usuario solicitar información de los nombres y descripciones generales de cada uno de los procesos que ofrece una instancia de WPS.
- *DescribeProcess*, ofreciendo al usuario información detallada de los procesos que pueden ejecutarse, incluyendo los inputs requeridos, los formatos permitidos y las salidas que se pueden producir.
- *Execute*, permite al usuario ejecutar la aplicación definida en el WPS.

El estándar provee una forma estandarizada para definir los procesos remotos, acceder a ellos y ejecutarlos. Por tanto, estas tres funciones básicas pueden

cubrir todo lo necesario para ofrecer un conjunto de servicios remotos de proceso basado en un marco común de estándares, poniéndolos a disposición de una amplia comunidad de clientes (Mass, 2008). Su utilidad práctica, se encuentra en el SIG web donde se pueden extender sus capacidades a través de estos procesos. De este modo, las posibilidades de este tipo de SIG se acercan a las clásicas de un SIG de escritorio, ya que sin procesos de análisis el SIG no tendría ningún sentido. El estándar WPS permite también la creación y publicación de cadenas de procesos, es decir, permite automatizar operaciones compuestas, lo cual otorga un mayor valor práctico atractivo a los servicios de procesos (Schaeffer, 2008).

2.4 Software Libre SIG Aplicado al Análisis de los Recursos Naturales: Casos de Estudio

El análisis de los recursos naturales permite el reconocimiento de una descripción total y detallada del territorio, especialmente de la evolución temporal, localizando las dinámicas y buscando las causas de las modificaciones. Como resultado, el análisis multitemporal asume no sólo una importancia relevante en la valoración del contexto urbanístico, paisajístico y estructural de un territorio, sino también un instrumento de monitorización en el tiempo y de gestión en la planificación territorial (Di Somma *et al.*, 2010).

La ordenación territorial puede considerarse como una técnica multidisciplinaria, de aspecto político, administrativo y global cuyo objetivo es el desarrollo equilibrado de las regiones y la organización física lo más equitativamente posible del espacio según un concepto rector del Estado. La ordenación debe ser democrática, participativa, global y coordinada con otras políticas, funcional al adaptarse a los diferentes territorios y prospectiva, en sentido de considerar las tendencias socioeconómicas, culturales y ambientales a medio y largo plazo. La inmensidad de la naturaleza, expresada en la extensa diversidad de recursos naturales tanto renovables como no renovables, se presta para ser estudiada posibilitando el estudio de fenómenos naturales de una forma simple, para la comprensión de procesos que muchas veces escapan a simple vista del espacio geográfico (Castillo *et al.*, 2012). Por ello se intenta mediante

herramientas esenciales de SIG y teledetección vincular las diferentes actividades desarrolladas por el hombre en cada porción del territorio.

Lillesand *et al.* (2015) definen a los SIG como un sistema basado en computadora, empleados para manejar cualquier información sobre características que pueden ser referenciadas o no por su ubicación geográfica, es decir, es capaz de manejar tanto datos de localización como datos de atributo relacionados con sus características descriptivas. Razón por la cual los SIG se han convertido en una ayuda indispensable para la planificación y gestión de los recursos naturales. Asimismo constituyen herramientas importantes de integración de información de diferente naturaleza, estructura y organización. Dada la habilidad que tienen para manejar una gran gama de información espacial son considerados como instrumentos estratégicos para la toma de decisiones en el proceso de planificación y gestión territorial.

Otra de las aplicaciones interesantes de los SIG es que permite automatizar la recolección y el manejo de grandes bases de datos georreferenciadas, haciendo más eficiente el proceso de manipulación y actualización de inventarios forestales, planificación y explotación de bosques, así como definir sectores latentes de incendios y establecer posibles áreas de reforestación (Conesa, 1996). Los planificadores forestales pueden utilizar herramientas SIG para vigilar los efectos de la deforestación y para planificar la coordinación y el sistema de ordenación maderera basándose en la información sobre tipos de suelos, especies requeridas, crecimiento y productividad, pudiendo incluso evaluar los efectos visuales de la extracción de madera en zonas bajo régimen de áreas protegidas dada su importancia y belleza natural.

Los avances y resultados de investigaciones y estudios realizados sobre los recursos naturales llevados a cabo con herramientas open source, combinando técnicas de teledetección, SIG y análisis estadístico han mostrado una alta capacidad para desarrollar trabajos como por ejemplo estudios de cambios de usos de suelo (Clemente, *et al.*, 2006, y López y Plata, 2009), evaluación del efecto de diferentes métodos de clasificación de imágenes satelitales sobre índices de paisaje aplicando la clasificación por regiones producto de la

segmentación de la imagen (Conde, *et al.*, 2009), evaluación y comparación de datos del satélite CBERS para el mapeado de áreas citrícolas (Payacan y Formaggio 2005), etc. Por su parte Pérez, *et al.*, (2004) para extraer información de imágenes de satélites para la detección de cambios de uso de suelo y tipos de cobertura, emplearon el software GRASS a través del procesamiento digital de imágenes. Para ello aplicaron técnicas de clasificación supervisada para la elaboración cartográfica de tipos de suelo. En el sector forestal estas técnicas de clasificación se ha empleado con éxito en la localización de áreas prioritarias de actuación para la ubicación de cortafuegos (Lozano, 2008), asimismo, se ha realizado la estimación del porcentaje de cobertura de copa arbórea (Valdés, *et al.*, 2006) y la generación de cartografía de áreas quemadas (Chuvieco *et al.*, 2007b; Oliva y Verdú, 2009).

El estudio de las transformaciones que ha sufrido el paisaje como consecuencia del crecimiento urbano a través del tiempo, requiere del uso de diversas fuentes de datos como mapas históricos, fotografías aéreas e imágenes de satélite, las cuales se integran en bases de datos de tipos de cobertura del suelo urbano que reflejan varias décadas de cambio en forma retrospectiva. Estas bases de datos se utilizan para analizar los efectos de la urbanización del paisaje, la modelación del crecimiento urbano y el cambio de uso de la tierra bajo diferentes escenarios alternativos de uso (López y Guevara, 2012). En los estudios desarrollados por la Comisión Nacional Forestal en México empleando el software libre QGIS e imágenes de satélites para el análisis de suelo han permitido determinar pérdidas y ganancias de cobertura vegetal, así como la transición significativa de diferentes tipos de bosques y masas de agua, incluyendo las zonas urbanas (CONAFOR, 2012).

Hace aproximadamente dos décadas, con las herramientas SIG disponibles era más difícil llevar a cabo estudios o proyectos ante problemas que se presentaban como es el caso de la arqueología, por la dificultad de analizar y presentar casos de estudio que excedían los límites regionales. En la actualidad es posible realizar este tipo de estudios mediante la aplicación de las técnicas de teledetección, ya que pueden abarcar extensas áreas con características ambientales disímiles al uso de la técnica de la teledetección

aplicada al conjunto de estructuras líticas de grandes dimensiones (Bognanni, 2010). La teledetección ofrece una visión global, realiza la observación de información en diferentes regiones no visibles del espectro y permite observaciones a distintas escalas, ya que se tiene frecuencia y homogeneidad en la adquisición de la información. Gracias a los satélites y a sus diferentes campos de visión y resolución espacial, las imágenes captadas permiten el análisis de la superficie terrestre a diferentes escalas y con distintos niveles de detalle. Desde una escala local hasta la global es posible realizar investigaciones multiescalares (Martínez y Martín, 2010).

El procesamiento de datos e imágenes de satélite a través de herramientas SIG constituyen una solución útil para estudios de degradación de suelos. Permiten identificar aquellos cambios significativos producto de las interacciones naturales o antrópicas que ayudan a tomar decisiones en la planeación territorial y gestión de los recursos naturales, como los estudios de vulnerabilidad a impactos antropogénicos. Los sensores más utilizados para este tipo de estudio son los de resolución espacial ypectral media, a bordo de plataformas espaciales de los programas Landsat, Spot, ASTER, EO, etc., los de alta resolución temporal, a bordo de las plataformas MODIS, NOAA, etc., con mayor resolución espectral, y los sensores con radar, en plataformas satelitales, Envisat, ERS, etc., (Pérez y García, 2013). Algunos estudios contemplan la cuantificación de superficies como selvas, agricultura de riego, bosques, agricultura temporal, cuerpos de agua y crecimiento demográfico (Plata & Hinojosa, 2015 y Londoño, 2012).

Por otra parte, los gestores, técnicos y agricultores demandan información actualizada y fiable para la toma de decisiones, es por ello que como herramienta de apoyo a la gestión agrícola, la teledetección es de vital importancia, ya que permite estudiar grandes extensiones de terreno a nivel local y regional con fines de mejorar el diagnóstico de la vegetación, la gestión de riego, agilización en los procesos de planeación, optimización en la eficiencia de los insumos, reducción de impactos ambientales y mejorar la conservación de los recursos naturales. La cobertura y usos de suelo están fuertemente ligados a factores socioeconómicos y decisiones políticas, por ello

es imprescindible conocer la distribución y superficie de los cultivos así como el estado fitosanitario de los mismos y demás recursos presentes a su alrededor (CITA, 2013).

Las técnicas de teledetección permiten entre otras ventajas realizar inventarios forestales, ya que se logra obtener una cobertura total del área analizada en un plazo corto de tiempo, reduciendo la intensidad del muestreo lo que hace que se reduzcan los costos de operaciones en campo. Esto a su vez optimiza los recursos, disponiendo de documentación visual de la situación actual de un territorio y los cambios acontecidos sobre él, permitiendo generar datos cartográficos fiables, contar con información de áreas de difícil acceso y la posibilidad de realizar evaluaciones retrospectivas de los cambios ocurridos durante un tiempo determinado (Koch, 2013).

Los datos obtenidos de la aplicación de técnicas de teledetección se han utilizado para el cartografiado de usos de suelo y cobertura terrestre a nivel mundial y/o a escala local, sobre la base de métodos que van desde la interpretación de imágenes visuales a los algoritmos de clasificación de imágenes espectrales, basadas en objetos. Algunos estudios de uso de la tierra utilizan el sistema de clasificación de coberturas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para utilizar los datos provenientes de sensores remotos (Lillesand et al. 2015).

La obtención y manipulación de imágenes satelitales facilita el análisis multitemporal de uso y cobertura de suelo mediante el procesamiento digital de imágenes. El desarrollo de este tipo de proyectos con herramientas de software libre, muestran la posibilidad de que las poblaciones de bajos recursos económicos tengan acceso al uso de las tecnologías de la información que facilitan y guían los planes de desarrollo y gestión del territorio. Los resultados obtenidos a partir de implementar software libre incorporando imágenes de satélite, ofrece una gran variedad de aplicaciones considerando los costos de licenciamiento en un segundo plano, abriendo la posibilidad a realizar proyectos de alto nivel tecnológico a costos accesibles para el público en general (Mendoza y García, 2011).

Las aplicaciones desarrolladas con estándares abiertos favorecen la interoperabilidad entre diferentes plataformas SIG, lo cual ha permitido la aparición de proyectos de código abierto que cumplen con las especificaciones internacionales establecidas por OGC, siendo además estos proyectos interoperables con soluciones propietarias basadas en las mismas especificaciones de estandarización. En este sentido, hay proyectos SIG de código abierto complementarios entre sí que permiten crear entornos de difusión y análisis de información raster y vectorial.

Entre las aplicaciones de software libre más difundidas se encuentran GvSIG, GRASS, SAGA, SEXTANTE, SPRIG, QGIS etc., que son comúnmente utilizados en el procesamiento de imágenes digitales y análisis estadístico, donde a través de su implementación los resultados muestran como las áreas analizadas son vulnerables a procesos erosivos a causa de la erosión hídrica y antrópica, así como a la ocurrencia de fenómenos naturales, ocasionando fuertes alteraciones y afectando a los recursos naturales (Castillo *et al.*, 2012, y Pérez y García, 2013).

Estudios como por ejemplo la epidemiología espacial de la especie Língua Azul desarrollada por Martins y Rocha (2012), empleando los componentes del software libre GRASS en la interfaz de QGIS para implementar una solución de cartografía web de bajo coste altamente estable para la gestión y análisis de datos de vigilancia entomológica en tiempo real son un ejemplo de la funcionalidad de estas herramientas. La ventaja de estos sistemas consiste en proporcionar una rápida y continua información espacial y alfanumérica de gran relevancia para la vigilancia y control de enfermedades en los cultivos. Estos autores utilizaron las librerías de MapFish como cliente web e incorporaron bibliotecas Javascript y OpenLayers para la creación de aplicaciones espaciales en internet así como PostGIS como soporte para el almacenamiento de objetos geográficos con características de especificaciones para bases de datos SQL, establecidas por OGC.

La difusión de herramientas de código abierto ha tenido su efecto sobre algunos países en vías de desarrollo tal y como indica González, *et al.*, (2010),

es el caso de la República Bolivariana de Venezuela el Centro Nacional de Tecnologías de la Información (CNTI) donde se está trabajando en colaboración con el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) para desarrollar la IDE de Venezuela apoyada completamente en soluciones de herramientas libres de código abierto, empleando los componentes de gvSIG como cliente SIG-IDE, PostgreSQL y su extensión espacial PostGIS como base de datos espacial, MapServer y Geoserver como servidores de mapas, Geonetwork como servidor de catálogo, OpenLayers y MapFish como cliente ligero para el geoportal, Debian como sistema operativo, Apache como servidor web y TomCat como servidor de aplicaciones.

III. FUENTES DE DATOS GEOGRAFIOS EN VENEZUELA



3 FUENTES DE DATOS GEOGRAFICOS EN VENEZUELA

Desde la elaboración del primer mapa conocido de Venezuela, trazado por Juan de la Cosa en su viaje de 1499-1500 (Fundación Polar, 1997), la información geográfica del país se ha ido produciendo y desarrollando en diferentes entes gubernamentales. En la década de los 80 comienzan a desarrollarse nuevas iniciativas en el país relativas a SIG, principalmente en instituciones gubernamentales relacionadas con el manejo de información espacial, como el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVS), el Instituto Nacional de Tierras (INTi), el Instituto Nacional de Desarrollo Rural (INDER), Alcaldías, Universidades y Empresas del Estado, entre otros.

La participación ciudadana aparece abiertamente durante la década de los años 90 como un nuevo actor de creciente protagonismo en la producción y consumo de información geoespacial. En este sentido, a partir de la promulgación de una nueva Constitución Nacional (Gaceta Oficial N° 5.453, 2000) la sociedad venezolana asume un carácter político “participativo” (Artículo 6 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela), con lo cual el marco legal y las instituciones políticas han venido fomentando y materializando la participación directa de los ciudadanos en el ejercicio del poder popular. La gestión de tierras adquiere consecuentemente un carácter participativo, lo que involucra a los grupos sociales organizados en actividades anteriormente reservadas exclusivamente al personal técnico de las instituciones responsables.

Nuevas instituciones como los Consejos Locales de Planificación Pública, los Consejos Comunales, los Comités de Tierra Urbana, los Comités de Tierras Rurales, las Mesas Técnicas de agua, las Mesas Técnicas de energía, las Comisiones de Demarcación del Hábitat y Tierras de los Pueblos Indígenas, se están conformando con los miembros de las propias comunidades y cuentan con poder de decisión dentro de los gobiernos locales y con acceso a recursos presupuestarios. Estas organizaciones requieren, para el cumplimiento de sus funciones, el acceso, uso y producción de información geoespacial. A este

respecto, los organismos encargados de las actividades de planificación, desarrollo, ejecución, control y evaluación de los planes de desarrollo de la nación son los principales consumidores de información geoespacial. Dado el gran número de entes gestores, frecuentemente las instituciones actúan de manera descoordinada, generando información en diferentes formatos analógicos y digitales, con diferentes especificaciones y de manera individual, por lo que la mayoría de las veces un organismo no conoce la información de la que disponen otros, inclusive perteneciendo a la misma institución. Esto tiene como consecuencia una ineficaz gestión de los recursos, provocando la duplicidad de esfuerzos de inversiones que a su vez se ve reflejado en la duplicidad de productos cartográficos procedentes de distintos organismo generando confusión e incertidumbre entre los usuarios.

Estos problemas, presentes en países poco desarrollados como Venezuela, se pueden subsanar con el desarrollo de un adecuado plan de ordenamiento geográfico donde se clasifiquen los distintos productos cartográficos generados, es decir, se deben delegar funciones a los diferentes organismos del estado sobre la producción cartográfica en sus distintas temáticas con el fin de generar servicios a los usuarios de la información geográfica, lo cual es posible mediante una IDE la cual proporciona servicios de catálogos en red con las distintas bases de datos geográficas. Las IDEs son gestionadas principalmente por el Estado de cada país, por tanto el principio de su funcionalidad radica en establecer acuerdos institucionales para su organización, coordinación y administración a nivel local, nacional y transnacional.

El desarrollo de los acuerdos organizativos, de las políticas y estándares de una IDE, permitirán a las numerosas organizaciones comunitarias del país y a las instituciones y órganos de decisión regional y nacional descubrir, adquirir, explotar y compartir la información geográfica requerida para la toma de sus decisiones de manera más fácil y con menos inversión de tiempo y recursos.

3.1 Marco Legal

El proveedor de datos geográficos más importante en Venezuela es el IGVSB, adscrito al Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPpA). Dicho instituto fue designado como ente rector de la actividad geográfica, cartográfica y catastral del Estado venezolano y por atribuciones de la ley es el responsable de verificar, certificar y establecer los procedimientos y normas para el levantamiento y representación de la información geográfica del país, así como de su guarda y custodia (Gaceta Oficial N° 37.378, 2000). La Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional, creada el 28 de febrero de 2000, tiene por objeto regular la formulación, ejecución y coordinación de las políticas y planes relativos a la geografía y cartografía, así como los relacionados con la implantación, formación y conservación del catastro en todo el territorio de la República.

Por otra parte, el decreto N° 3.390, publicado en Gaceta Oficial N° 38.095 de fecha 28 de Diciembre de 2004, establece:

“Que la adopción del Software Libre desarrollado con Estándares Abiertos en la Administración Pública y en los servicios públicos facilitará la interoperabilidad de los sistemas de información del Estado, contribuyendo a dar respuestas rápidas y oportunas a los ciudadanos, mejorando la gobernabilidad”.

Dicho decreto fue aprobado el 13 de julio de 2005, con la finalidad de llevar a cabo el plan nacional de migración hacia tecnologías desarrolladas con estándares abiertos, por lo que la administración pública venezolana empleara prioritariamente software libre en sus sistemas, proyectos y servicios informáticos.

El Centro Nacional de Tecnologías de la Información (CNTI) en colaboración con el IGVSB, son los entes encargados de la aplicación del decreto 3.390. Así mismo, estos entes son los responsables del proyecto IDE de Venezuela y el geoportal para la consulta cartográfica en Red.

3.1.1 Fundamentos de las IDEs Iberoamericanas

Las iniciativas IDE en Iberoamérica se encuentran en diferentes etapas de desarrollo. La mayor parte de los miembros de esta comunidad está desarrollando alguno de los componentes de la IDE, muchos de ellos con un marco legal deficiente, y otros aún se encuentran en etapas iniciales de desarrollo de servicios de catastro o construyendo el conjuntos de datos básicos (Delgado y Crompvoets, 2007). Sin embargo, existen organismos internacionales como GSDI que están apostando y asistiendo en el desarrollo de IDE para Latinoamérica.

La Sociedad Internacional Geoespacial es un nuevo emprendimiento de la asociación GSDI para apoyar y establecer una comunidad internacional de especialistas y profesionales con intereses geoespaciales, en IDEs, SIG y otras áreas relacionadas. El objetivo es producir y fortalecer la comunicación internacional entre individuos que participan activamente en la promoción, desarrollo y avance de las IDEs y los conceptos que la envuelven. Entre los organismos que manifiestan su apoyo se encuentran el IPGH, la Red de Información Geoespacial para la Integración Suramericana (Geo-Sur), el Comité Permanente para la Infraestructura de Datos Geoespaciales de las Américas (CP-IDEA), la Comunidad Andina de Naciones (CAN), etc.

El IPGH es un organismo internacional, científico y técnico de la Organización de los Estados Americanos, que ha estado desde su creación en el año 1928, en permanente comunicación con investigadores e instituciones científicas de los Estados Miembros. Este organismo está dedicado a la generación y transferencia de conocimiento especializado en áreas de cartografía, geografía, historia y geofísica, tiene como finalidad mantener actualizados los datos e información espacial. Entre los objetivos del IPGH destacan:

- Fomentar, coordinar y difundir los estudios cartográficos, geofísicos, geográficos e históricos y los relativos a las ciencias afines de interés para América.

- Contribuir a la modernización de las Secciones Nacionales y al incremento del sentido de corresponsabilidad con el Instituto.
- Promover el desarrollo institucional de las organizaciones vinculadas con la producción de la información cartográfica, geográfica y geofísica continental.
- Propiciar las actividades multidisciplinarias de entidades y especialistas y la consolidación de la red profesional panamericana a fin de integrar eficazmente a la comunidad, en particular, las nuevas generaciones de especialistas.
- Redefinir, estimular y consolidar el papel del IPGH como identificador y articulador de competencias regionales e institucionales.

El IPGH contribuyó conjuntamente con el comité ISO/TC211 a producir la versión en español de la guía de normas (IPGH, 2013) a fin de estimular en la comunidad el uso de estándares y facilitar su aplicación así como generalizar su uso en el campo de la información geográfica digital de forma que el conjunto de normas aplicables a los objetos y a los fenómenos directa o indirectamente asociados con la localización relativa a la Tierra constituyan una realidad en la región y sean el marco para el desarrollo de múltiples aplicaciones y sectores que requieren datos geográficos estructurados.

En relación a las normas, el IPGH está trabajando desde el 2006 conjuntamente con ISO TC/211 para desarrollar un Perfil Latinoamericano de Metadatos que en la actualidad va acorde con el trabajo desarrollado por el Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” de Colombia y a nivel regional con el importante apoyo del Programa GeoSur bajo el auspicio de la Corporación Andina de Fomento (CAF). En este contexto se pretende crear un servicio regional sin costo ni restricciones de uso, en donde el usuario pueda conocer tanto las características del perfil como las particularidades de cada país, estimulando de este modo la aplicación y la interoperabilidad de los datos espaciales a nivel nacional e internacional (IPGH, 2010).

Por otro lado, la Red GeoSur, liderada por la CAF y el IPGH, coloca a disposición del público información geográfica de América Latina y el Caribe destinada a la planificación y análisis de actividades de desarrollo. Los servicios Web desarrollados o auspiciados por GeoSUR ofrecen acceso a mapas, fotografías aéreas y datos geográficos elaborados por las agencias participantes en temas como topografía, medio ambiente e infraestructura, entre otros.

GeoSur desarrolla servicios geográficos en una plataforma Web que permite a los usuarios obtener, localizar, consultar y analizar información espacial. Estos servicios son operados y mantenidos por institutos geográficos, ministerios de medio ambiente y otras instituciones participantes de Suramérica y Panamá. Estas instituciones registran sus geoservicios y metadatos al portal, y a partir de ese momento están disponibles al público.

El Comité Permanente para la Infraestructura de Datos Geoespaciales de las Américas (CP-IDEA) se establece de conformidad con la Resolución No. 3 de la Sexta Conferencia Cartográfica Regional de las Naciones Unidas para las Américas, UNRCC- Américas, celebrada en Nueva York entre el 2 y 6 de Junio de 1997.

Las metas del CP-IDEA están enmarcadas en los principios de la Agenda 21 de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, con la finalidad de maximizar los beneficios económicos, sociales y ambientales derivados del uso de la información geoespacial, a partir del conocimiento e intercambio de las experiencias y tecnologías de diferentes países, basados en un modelo común de desarrollo, permitiendo el establecimiento de una IDE en la región de las Américas. Entre los objetivos del comité destacan:

- Establecer y coordinar las políticas y normas técnicas para el desarrollo de la infraestructura regional de datos geoespaciales de las Américas.
- Promover con carácter prioritario el establecimiento y desarrollo de las IDEs nacionales de cada uno de los miembros del CP-IDEA.

- Fomentar el intercambio de información geoespacial entre todos los miembros de la comunidad de las Américas, respetando su autonomía, conforme a sus leyes y políticas nacionales.
- Definir lineamientos y estrategias para apoyar a las naciones, miembro de la comunidad, en el desarrollo de la información catastral teniendo en cuenta las necesidades individuales de cada país.

La CAN estableció una IDE regional que centraliza el acceso a la información proveniente de los países miembros. El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) ha liderado esta iniciativa con la creación de un portal de información geográfica que integra los datos de estos cinco países permitiendo su uso, actuando como mecanismo de integración sub-regional. La arquitectura del geoportal de la IDE de la Comunidad Andina de Naciones (IDECAN) está basada en el administrador de contenidos y la visualización de mapas la cual se realiza por medio de una implementación del cliente Degree así como el geoportal. Actualmente, el geoportal de IDECAN cuenta con capas de información base de dichos países. Entre los objetivos de la comunidad destacan:

- Optimizar la explotación de los datos disponibles en los países, propiciando la documentación y mejorando su accesibilidad e interoperabilidad.
- Fomentar la armonización progresiva de los datos espaciales basada en las IDEs nacionales, pudiendo utilizar la capacidad legislativa de la CAN para generar normas.
- La IDE Andina se desarrollará a partir de las organizaciones nacionales existentes y activas en la producción y utilización de información espacial.
- La IDE Andina solo abordará aquellos aspectos necesarios para lograr la coherencia de la información espacial en los niveles y temas orientados a sustentar las políticas comunitarias.

- La IDE Andina no pretende un aumento supletorio o desproporcionado de la carga administrativa, técnica y humana de los países miembros, sino un trabajo coordinado de mejora continua.

3.1.2 Situación Actual de la Información Geográfica en Venezuela

Algunas instituciones del Estado Venezolano no contemplan entre sus principales atribuciones el levantamiento y gestión de la información espacial, sin embargo se ven obligadas a hacerlo por desconocimiento de los datos existentes en otros entes o por dificultades técnicas o burocráticas para su obtención. Hay organizaciones comunitarias que no cuentan con el acceso a geodatos por lo que se dificultan las actividades de gestión participativa en la planificación y desarrollo de tierras y servicios sociales.

Los organismos públicos encargados de la gestión de información como el IGVSB, el Ministerio del Ambiente y de los recursos naturales, el Ministerio de Agricultura y Tierras (MAT), el Instituto Nacional de Tierras (INTi), el Ministerio de Infraestructuras (MINFRA), y demás instituciones y Universidades, tradicionalmente han generado información del territorio de manera independiente siendo común la duplicidad de esfuerzos e información dado que esta información es requerida a fin de contar con una caracterización del medio físico y socio-económico a escala local desde el punto de vista de la gestión participativa para el desarrollo sustentable.

Ante este escenario, la República Bolivariana de Venezuela, a pesar de disponer de plataformas SIG en muchas instituciones públicas, de contar con una base cartográfica digital y la disposición de metadatos de la información básica del país, no cuenta con los componentes necesarios de la IDE para su correcto funcionamiento. Esto es debido a la falta de acuerdos legales que promuevan su desarrollo así como la falta de liderazgo institucional que coordine e impulse su promoción y construcción ya que la Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional no contempla los conceptos relativos a las IDE, aunque si designa al IGVSB como el ente rector de la geo-information del país.

Abarca y Bernabé (2008) evaluaron la viabilidad del desarrollo de una IDE en Venezuela a través del Índice de Alistamiento o Índice de Preparación (Readiness Index). Este índice se define como el grado en el cual un país está preparado para compartir su información geográfica local, nacional, regional o global, para lo cual demanda un marco legal que ordene la provisión de una variedad de servicios geo-espaciales y los ofrezca a través del web. Este grado de preparación se determinó cuantitativamente valorando distintos factores. De acuerdo con el resultado obtenido por los autores, Venezuela se encontraba para ese año en un nivel bastante bajo en comparación con países de similar nivel de desarrollo socio-económico en la región, con un valor de 0,32% por detrás de países como Brasil, Chile, México, Colombia, Argentina, Cuba, Perú, Uruguay y Ecuador.

3.2 Marco Institucional

3.2.1 Entidades Productoras de Información Geográfica en Venezuela

El IGVSB tiene por competencias diseñar, dirigir y ejecutar planes, programas y proyectos para la generación, procesamiento y divulgación de datos e información geográfica requerida por los organismos, instituciones y entes públicos y privados a fin de actualizar los planes y programas de ordenación del territorio. En este sentido, entre los principales organismos e instituciones del estado productores de información en el ámbito geográfico se encuentran: el INTi, adscrito al Ministerio del Poder Popular (MPP) para la Agricultura y Tierras, INDER, la Fundación de Geografía y Cartografía Militar (FUNGECAMIL), adscrita al MPP, las diferentes Corporaciones regionales de desarrollo (CORPOCENTRO, CORPOANDES, CORPOLLANOS, CORPOZULIA, CORPORIENTE, CORPOVARGAS y FUDECO), adscritas al MPP para la Planificación y Desarrollo (MPD), Petróleos de Venezuela (PDVSA) y las Empresas Eléctricas Regionales, adscritas también al MPP para la Energía y Petróleo, entre otros. Todos realizan diversas actividades encaminadas con la producción cartográfica del país haciendo uso de herramientas de cartografía básica y temática, sistemas de posicionamiento

global por satélite, sistemas de procesamiento digital de imágenes, SIG y cartografía digital.

En estas actividades también participan las universidades e institutos de investigación científica del país, empresas privadas de consultoría y 335 municipios distribuidos en los 24 estados de la república, los cuales, por atribuciones de la ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional, son los responsables de la formación y conservación del catastro nacional, con la supervisión y especificaciones del IGVSB. Existen otros entes del Estado que gestionan información espacial de manera rutinaria, pero de menor envergadura que los mencionados como son las empresas básicas de Ciudad Guayana (CVG Tecmin, CVG Venalum, etc) o CorpoVargas, entre otros.

Además, es importante destacar la existencia en el país de una red nacional en constante crecimiento de espacios comunitarios de acceso a Internet denominados como INFOCENTROS y Centros de Comunicación Comunal, siendo actualmente un total de 547 centros en las principales ciudades del país. Estos entes, participan con los órganos del Estado, en la formulación, ejecución, control y evaluación de las políticas públicas y en consecuencia, producen algún tipo de información geográfica. (Gaceta Oficial N° 38.648, 2007). Entre estos centros destacan:

1. Consejos locales de Planificación Pública; encargados conjuntamente con las Alcaldías Municipales de la planificación integral del gobierno local y tienen como competencia la elaboración de una base de datos para los proyectos del municipio.
2. Consejos Comunales; vinculados a los Consejos locales tienen participación directa en la elaboración de los proyectos municipales así como en su ejecución y supervisión (Gaceta Oficial N° 39.335, 2009). Esta organización se encarga de coordinar y organizar el trabajo de instancias comunitarias, realizando algunas de sus actividades; trazando las poligonales de sus áreas de influencia, realizando censos y haciendo levantamientos catastrales y de redes de servicio, bajo la supervisión de las alcaldías

municipales. Entre estas instancias de trabajo, las que tienen mayor relación con el uso y producción de información geográfica son:

- a) Comités de Tierra Urbana (Gaceta Oficial Nº 37.378, 2002), que tienen entre sus atribuciones la creación de un SIG integral para la comunidad que contribuya con el levantamiento catastral de los núcleos urbanos del país a fin de regularizar la tenencia de los predios urbanos de su respectiva comunidad, realizando para ello los levantamientos planimétricos parcelarios y su correspondiente ficha catastral.
- b) Comités de Tierras Rurales: se encargan de la organización comunitaria en el medio rural promoviendo los procedimientos de denuncia, recuperación y producción de tierras infrautilizadas, para lo cual generan información espacial relacionada tanto con el uso actual de la tierra así como con su conocimiento de titularidad (Gaceta Oficial Nº 5.771).
- c) Mesas Técnicas de Agua y Energía, ambas participan con las Alcaldías locales, las empresas energéticas y con cooperativas de servicio en la planificación, ejecución, administración, evaluación, control y defensa de la prestación de servicios públicos de suministro de agua, electricidad y gas doméstico. En muchas comunidades están realizando el levantamiento plani-altimétrico de las redes de servicios para mejorar su funcionamiento, generando nueva información espacial sobre la base cartográfica existente.

3.2.2 Proyecto IDEGeoVen en Venezuela

En septiembre de 2008, el Centro Nacional de Tecnologías de Información (CNTI) inició la elaboración del documento de términos de referencia para llevar a cabo el proyecto del Geoportal IDE de Venezuela, comenzando en enero del año 2009 la ejecución de la fase inicial del proyecto, incorporándose el IGVSB como ente rector cartográfico del país. El objetivo principal del proyecto fue diseñar e implantar el Geoportal Simón Bolívar bajo software libre, permitiendo la integración de los entes generadores de información georreferenciada para la consulta y acceso remoto a la información espacial

con fines de contribuir con la planificación y gestión de recursos para beneficio de la población venezolana (IGVS 2008).

Todo este movimiento es el resultado de un proceso de determinación de los factores que limitan el desarrollo de los SIGs en Venezuela, para lo cual el CNTI, en su rol de promotor y rector de las tecnologías de la información, formula el proyecto Geoportal Venezolano “Simón Bolívar”, a través de lo que sería su etapa inicial de la IDE de Venezolana (IDEGeoVen). Este proyecto torna como una necesidad de máximo interés para las instituciones y personas que en Venezuela precisan de información georreferenciada para el desarrollo de sus actividades. La propuesta espera que las instituciones que generen información geográfica puedan integrarse modularmente a la IDE siguiendo una serie de estándares y recomendaciones basados en normas ISO y especificaciones OGC para el desarrollo e integración de servicios Web WMS, WFS, WCS destinados a la publicación de información geográfica además de incluir servicios de metadatos y buscador de nombres geográficos (GSDI, 2009).

IV. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO



4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente trabajo se ha desarrollado sobre los municipios Casacoima y Sotillo, del Estado Delta Amacuro y Monagas respectivamente. Estos municipios se localizan en Venezuela, en la parte septentrional de América del Sur, geográficamente entre las coordenadas $8^{\circ}40'26,39''$ N y $62^{\circ}44'29''$ W, y $8^{\circ}18'18,92''$ N y $61^{\circ}47'11,89''$ W (WGS84) (World Geodetic System 84). En conjunto limitan al norte con los municipios Tucupita (Estado Delta Amacuro), Uracoa y Libertador (Estado Monagas), al sur con los municipios Piar, Caroní y Padre Pedro Chien (Estado Bolívar), al este con el municipio Antonio Díaz (Delta Amacuro) y al oeste con los municipio Libertados e Independencia (Estado Anzoátegui), (Figura 12).

El estado Delta Amacuro (Figura 13) se encuentra situado al este de Venezuela, albergando el delta del río Orinoco. Se encuentra entre los paralelos, $7^{\circ}38'$ y $10^{\circ}3'$ Norte y los meridianos $63^{\circ}30'$ y $59^{\circ}48'$ Oeste (WGS84). Limita al norte con el Golfo de Paria y el Océano Atlántico, al sur con el estado Bolívar, al este con el Océano Atlántico y el territorio de la Guyana Esequiba y al oeste con el estado Monagas. Tiene una superficie de 40.200 km², siendo su capital Tucupita. Se subdivide en cuatro municipios (Antonio Díaz, Pedernales, Tucupita y Casacoima) y 22 Parroquias.

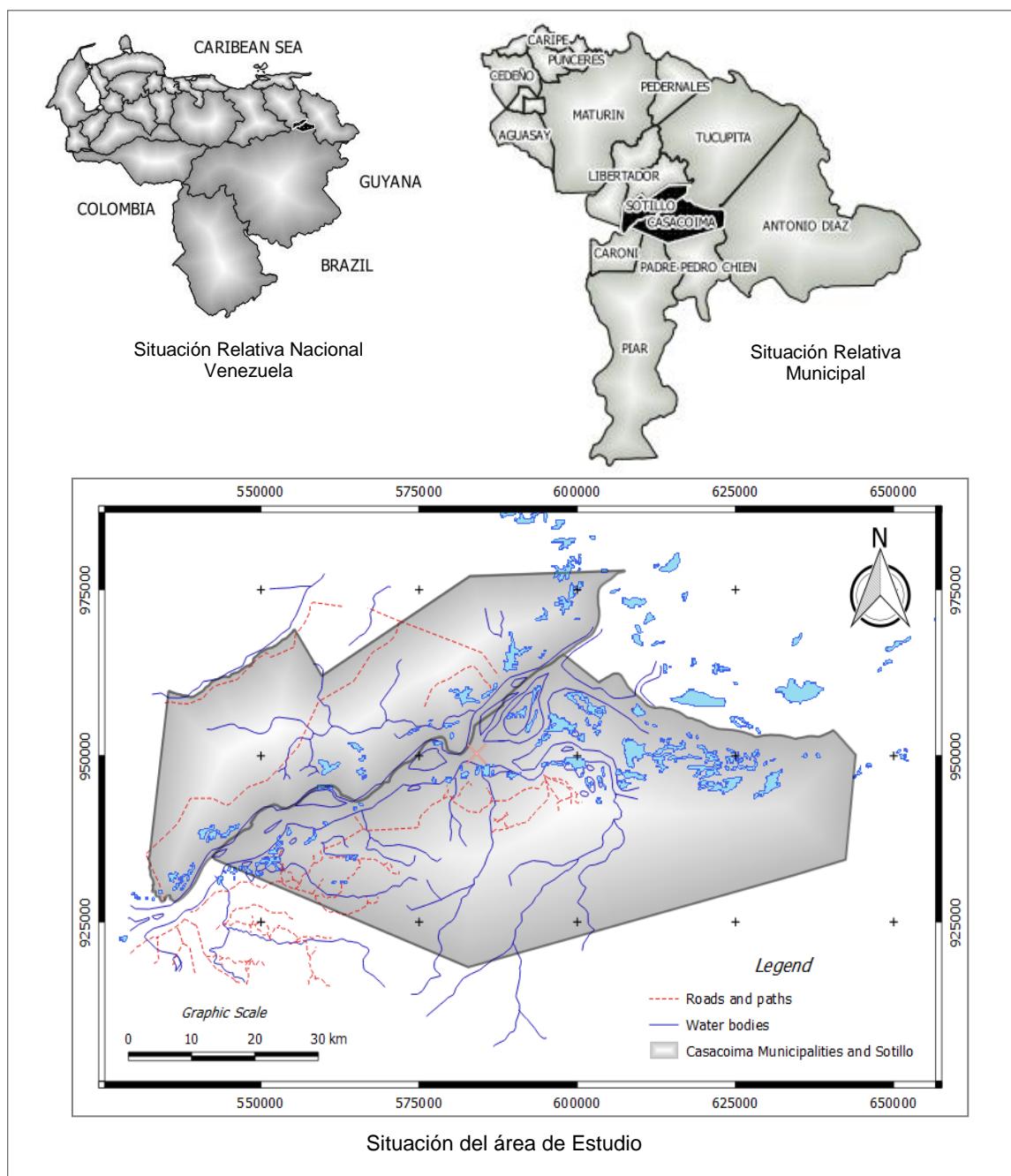


Figura 12. Delimitación conjunta de la zona de estudio

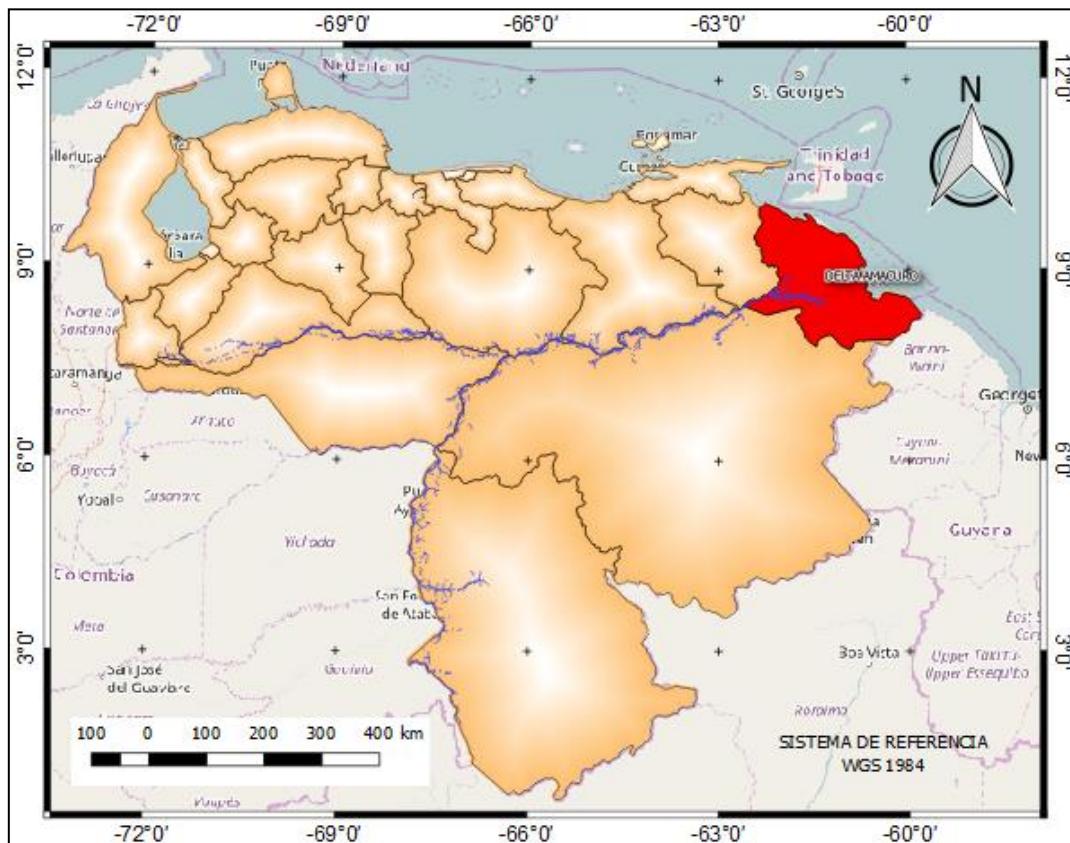


Figura 13. Situación Relativa Nacional del estado Delta Amacuro

La segunda parte de la zona de estudio correspondiente con el estado Monagas (Figura 14), se ubica en la región oriental del país; entre los paralelos 9°56' y 10°39' Norte y los meridianos 62°25' y 65°13' Oeste (WGS84), entre la Cordillera Oriental por el norte (estado Sucre) y los llanos bajos u orientales por el sur (Estado Bolívar), así como una porción de la región deltaica por el este (estado Delta Amacuro) y por el oeste limitando con el estado Anzoátegui. Tiene una superficie de 28.900 km², siendo su capital Maturín. Esta zona se caracteriza por la presencia de grandes extensiones planas (Llanos bajos de Monagas) al sur. Al norte se encuentra la Cordillera Oriental o Macizo Oriental, una pequeña estribación de la Cordillera de la Costa. El estado cuenta con 13 municipios (Acosta, Aguasay, Bolívar, Caripe, Cedeño, Ezequiel Zamora, Libertador, Maturín, Municipio Piar, Punceres, Santa Bárbara, Uracoa y Sotillo) y 31 parroquias.

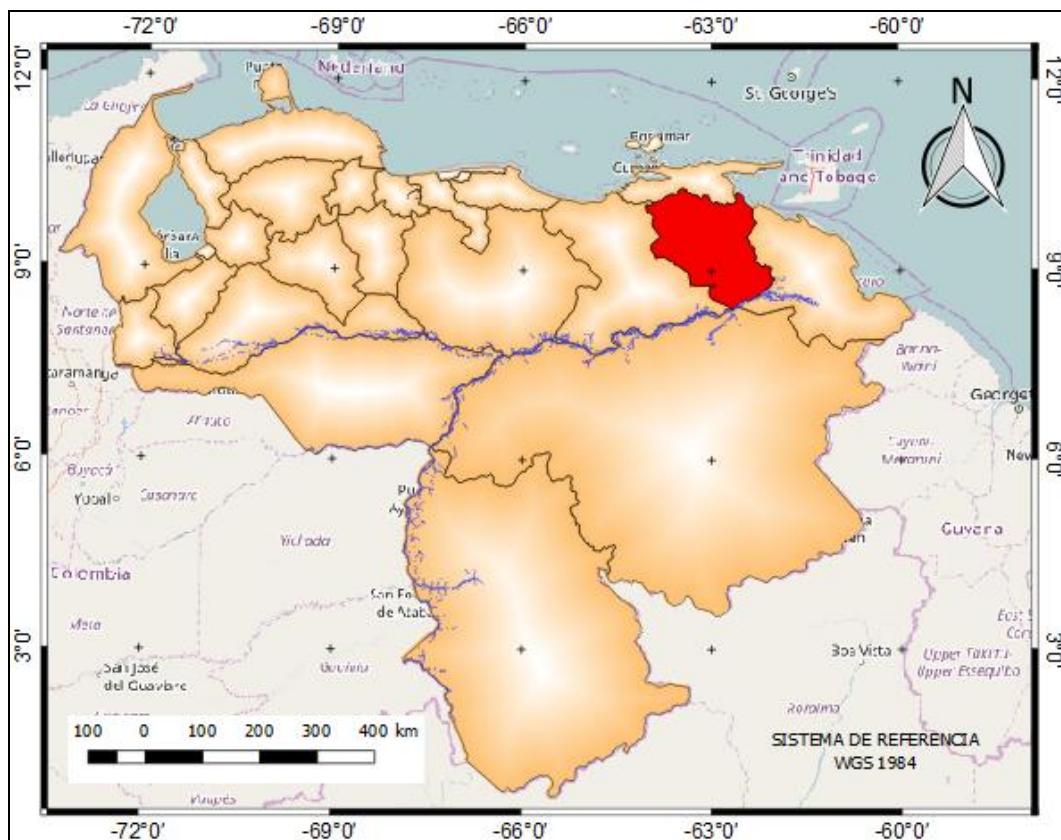


Figura 14. Situación Relativa Nacional del estado Monagas.

4.1 Situación Geográfica Regional del Municipio Casacoima

El municipio de Casacoima, en el estado Delta Amacuro (Figura 15), fundado en 1966 tiene su capital en Sierra Imataca. Se localiza entre los paralelos 07°46', 10°04' Norte y los meridianos 59°47', 62°36' Oestes (WGS84) y una altitud de 48 msnm. Sobre él destacan dos formaciones geológicas; el Macizo Guayanés al sur y el Delta del Orinoco al norte (Lozada et al., 2011). Entre sus principales actividades económicas destacan el turismo orientado a la Reserva Forestal Imataca que ocupa la mayor parte del territorio, la ganadería por sus extensas tierras, la pesca y la agricultura.

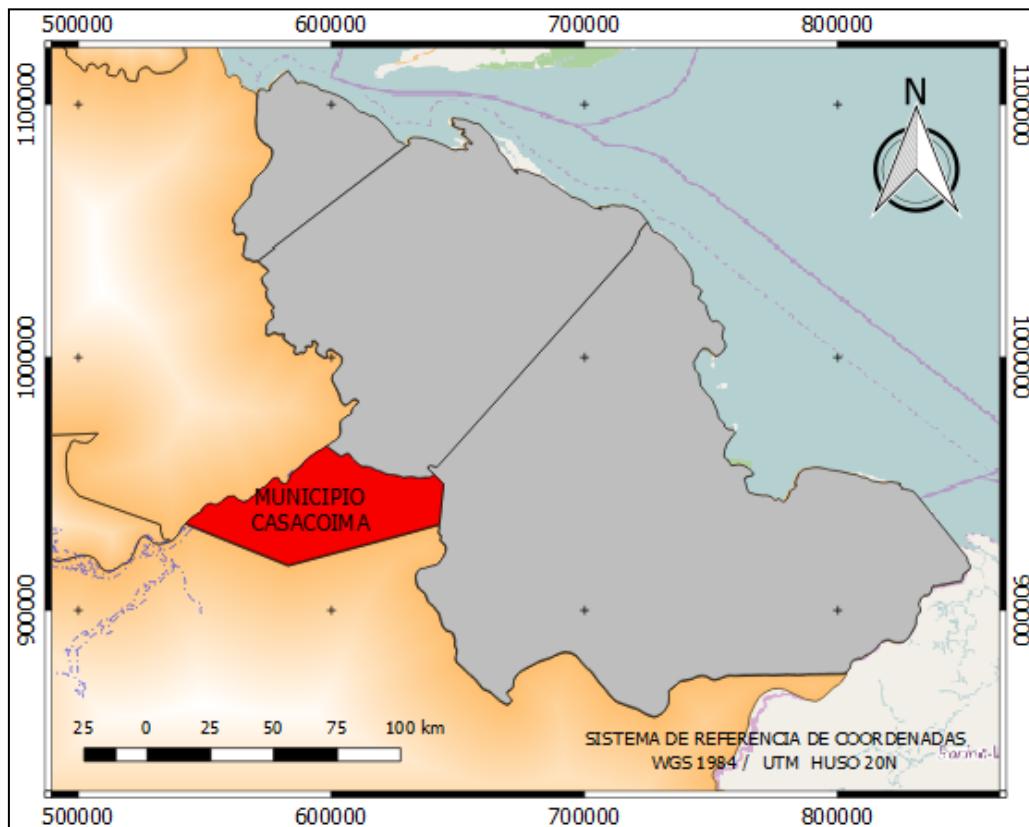


Figura 15. Situación geográfica regional de Casacoima

El municipio está integrado por cinco parroquias: Imataca (Sierra Imataca), Cinco de Julio (Moruca), Juan Bautista Arismendi (Piaocoa), Manuel Piar (El Triunfo) y Rómulo Gallegos, (Sta. Catalina). Casi todo el municipio está enclavado en la Reserva Forestal Imataca, por lo que su desarrollo económico se ha visto frenado por algunas restricciones legales y ecológicas. Sin embargo, dicha belleza natural le otorga un gran valor turístico, que hace que cientos de visitantes de las distintas partes de Venezuela vayan a visitarlo. Tiene una superficie de 2.921 Km² y una población igual a 29.200 habitantes (INE, 2014a).

La región cuenta con dos estaciones climáticas bien diferenciadas, invierno (temporada lluviosa) y verano (temporada de sequía). En cuanto al estado Delta Amacuro, la precipitación anual es alta en toda la región, mayor en la costa y decreciente a medida que penetra hacia el Oeste en tierra firme. La temperatura media anual es de 26,7C°, con precipitaciones de 2000 mm

anuales en una franja de 60 km que disminuye hasta 1600 mm a 100 km del litoral y hasta 1000 mm en el vértice del Delta a 140 km de la costa. Predominantemente presenta vegetación selvática semi-árida con bastantes zonas de sabanas y una porción de bosque al sur (Roa, 2010). En el municipio de Casacoima se encuentran los ríos (Piedra, Grande, Cuya), los caños (Tres Caños, El Toro, Macareo), la Laguna de Casacoima – de interés histórico y la laguna de Baratillo, Ceiba así como los saltos (El Mono, y Sacoroco) (Gobernación del estado Delta Amacuro, 2009).

4.2 Situación Geográfica Regional del Municipio Sotillo

El municipio Sotillo en el estado Monagas (Figura 16), fundado en 1790 por el Fraile Joaquín de Motora, tiene su capital en Barrancas del Orinoco. Este municipio debe su nombre a la memoria del prócer de la Independencia Juan Antonio Sotillo, nacido el año 1790 y fallecido en 1874, a la edad de 84 años. Se localiza geográficamente entre los paralelos 08°24', 08°54' Norte y los meridianos 62°00', 62°44' Oeste (WGS84) y una altitud de 6 msnm. Entre sus principales actividades económicas destaca fundamentalmente la ganadería bovina, de gran importancia histórica por ser la que le dio organización territorial al municipio, la actividad pesquera por ser Barrancas punto natural para la pesca proveniente de los caños del municipio y el Delta del Orinoco; la actividad petrolera y forestal, influyentes en la dinámica de crecimiento del municipio (Gobernación del estado Monagas, 2009).

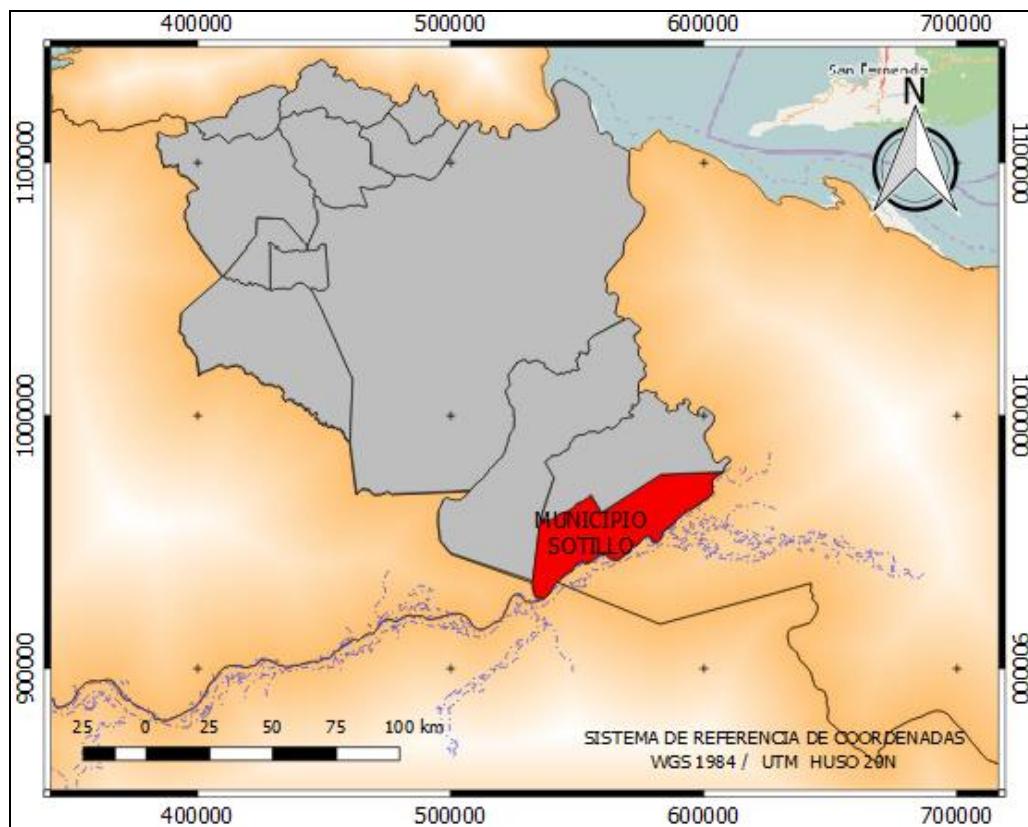


Figura 16. Situación geográfica regional de Sotillo

El municipio está integrado por dos parroquias: Barrancas y Los Barrancos de Fajardo. Ocupa el 6,71% del Territorio Estatal, con una población es de 21.482 habitantes (INE, 2014b). Tiene una superficie de 1.939 Km², con una densidad de población 10,5 hab/Km².

El municipio dispone de significativos recursos naturales, arqueológicos y etnográficos importantes para el desarrollo de la actividad turística: entre ellos destacan: el Río Orinoco, la Laguna de Guarguapo, la Laguna de Guatero y la Laguna Saladero, El Museo de Uyapar, con la arqueología del yacimiento arqueológico de Saladero es patrimonio histórico y artístico de la nación, siendo testimonio de una de las culturas más antiguas y expandidas que tuvo Venezuela: “La Cultura Barrancoide”, la cual se desarrolló 3000 años atrás. Cuenta con el centro Urbano de Barrancas, designado patrimonio histórico nacional, la fortificación de “Las Trincheras”, fortaleza militar que data desde los años 1814 - 1815 y las comunidades indígenas Waraos.

Climáticamente presenta dos unidades fisiográficas características, la Mesa Llana y Planicie Aluvial del Orinoco, así mismo presenta una temperatura media anual de 27,0 C°, con precipitaciones medias anuales de 1.116 mm y recursos hídricos de gran importancia como los ríos, Uracoa, Orinoco, Caño Guarguapo, Caño Mánamo.

Este municipio está enmarcado dentro del Bosque Seco Tropical, la formación vegetal predominante es de sabana abierta, la cual se compone de gramíneas perenne y dispuesta en macollas, exenta casi totalmente de elementos arbóreos o arbustivos, presentándose en forma muy dispersa. La continuidad de las sabanas se interrumpe por la presencia de morichales y bosques de galería (Gobernación del estado Monagas, 2009).

V. MATERIALES Y EQUIPOS

5 MATERIALES Y EQUIPOS

5.1 Materiales Utilizados

La recopilación de la información espacial parte de la base proveniente de tres fuentes distintas:

1. Servicios WMS del portal de la IDE de Venezuela (IDEVEN, 2013).
2. Información cartografía básica local proporcionada por la empresa Técnica Minera perteneciente a la Corporación Venezolana de Guayana (CVGTECMin), la cual fue clave para la caracterización del uso de suelo y tipos de cobertura.
3. Información digital de libre acceso, concretamente imágenes de satélites procedentes del sensor CBERS – 2, del Satélite Chino-Brasileño de Recursos Terrestre, obtenidas del portal web del INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) de Brasil (INPE, 2012).

5.1.1 Cartografía Básica

La cartográfica básica de vegetación y tipos de suelo fue suministrada de forma gratuita previa solicitud por escrito a la empresa CVGTECMin, el cual es uno de los principales entes productores de información geográfica a nivel regional del estado Bolívar, orientado a la realización de estudios geoestratégicos de apoyo al conocimiento de la región, para la toma de decisiones relativas a la planificación del ordenamiento territorial y el desarrollo integral. Dicha información se visualizó previamente a través de la infraestructura de datos espaciales de Venezuela (IDEVEN), el cual tiene entre sus funciones facilitar el acceso y uso de datos, metadatos y servicios geográficos a la administración pública, sector privado, universidades y público en general. Posteriormente fueron adquiridas a través de protocolos FTP en formato PDF, los mapas de vegetación y uso de suelo correspondientes al área de estudio. Las Figuras 17, 18 y 19 muestran a modo de ejemplo la cartografía de suelos y de vegetación suministrada.

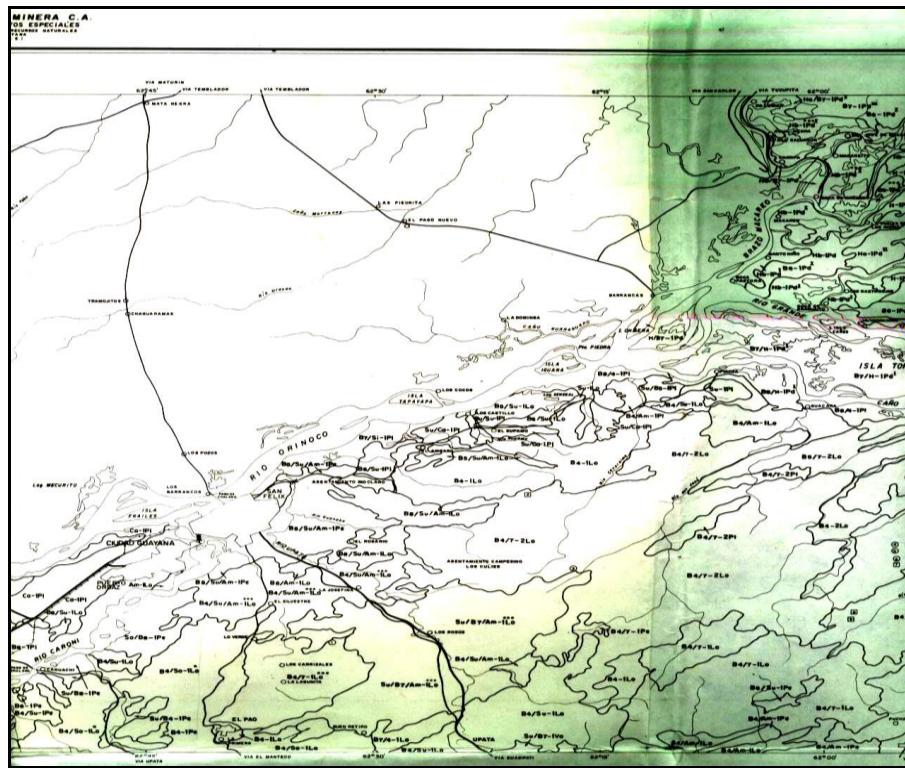


Figura 17. Cartografía Básica de Vegetación (Municipio Casaccoima).

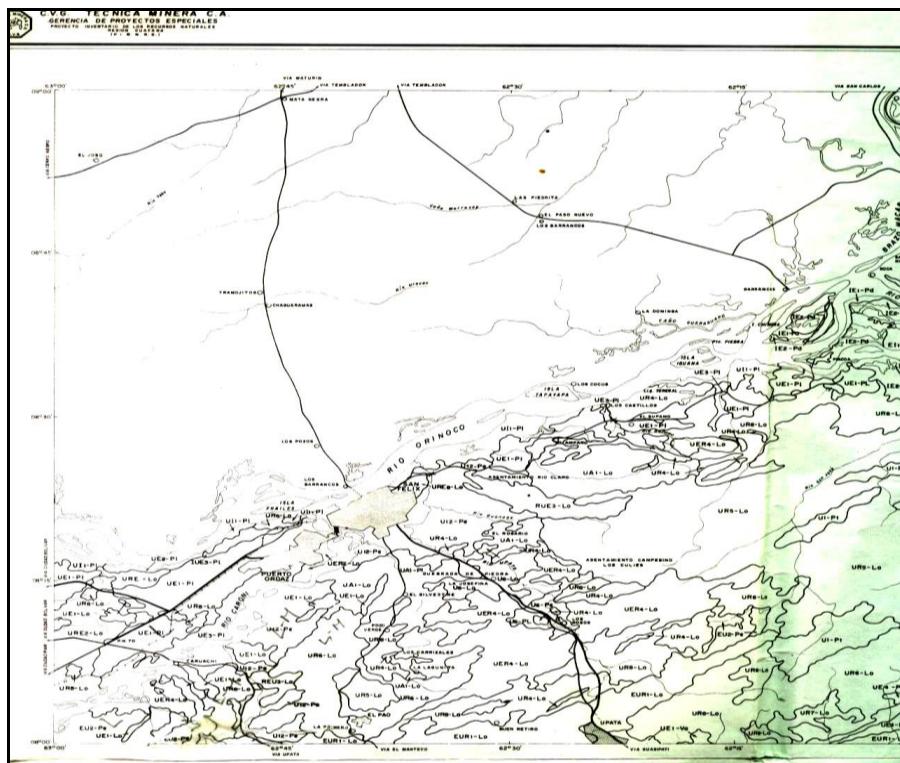


Figura 18. Cartografía Básica de Tipos de Suelo (Municipio Casacoima).

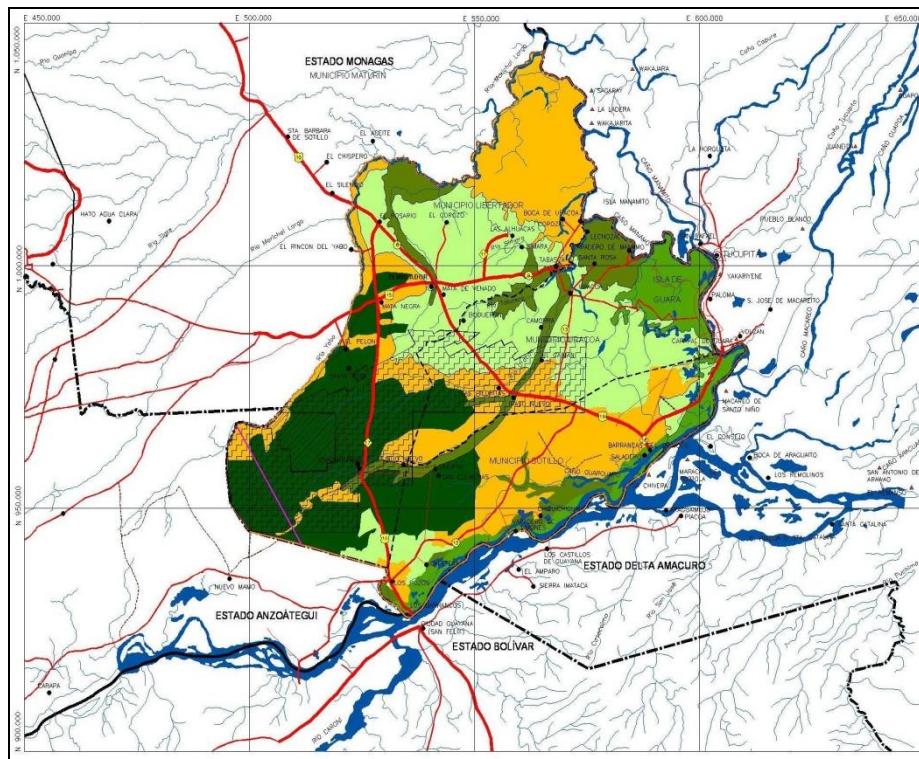


Figura 19. Cartografía Básica de Tipo de Usos (Municipio Sotillo).

5.1.2 Imágenes de Satélites

Se trabajó con imágenes procedentes de la plataforma CBERS-2 (Satélite Chino-Brasileño de Recursos Terrestre) obtenidas por el sensor en Septiembre de 2004, buscando en todo momento el menor porcentaje de cobertura de nubes con objeto de ejercer una mejor explotación de la información. La Tabla 2 muestra un resumen de las características de las imágenes empleadas.

Tabla 2. Resumen de características de imágenes CBERS – 2

Imagen	CBERS resolución 20m
Adquisición de la escena	Sep. 2004
Instrumento	Cámara de alta resolución CCD (Couple Charged Device)
Bandas espectrales	4 Bandas espectrales. 1 Banda pancromática. de 2.5m
Recubrimiento	113 Km de ancho
Resolución temporal	Cada 26 se revisita la misma franja de terreno

Fuente imagen CBERS - 2 : <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

Las dos imágenes procedentes de la plataforma CBERS-2 fueron adquiridas desde el portal web de descarga del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE) de Brasil. La disponibilidad de estas imágenes es producto del acuerdo firmado entre los gobiernos de Brasil y China el 6 de julio de 1988 en colaboración con el CAST (Academia China de Tecnología Espacial), por el cual desarrollaron un programa de construcción de dos satélites avanzados de tele-observación llamado Programa CBERS. La unión entre ambos países es un esfuerzo bilateral para romper las barreras que impedían el desarrollo y la transferencia de tecnologías sensibles impuestas por los países desarrollados. Posteriormente en el año 2004, el INPE pone a disposición de la comunidad brasileña e internacional el uso de estas imágenes de forma gratuita, según lo establecido en su licencia de uso.

La imagen CBERS-2 presenta una resolución espectral igual a 5, es decir opera con cinco bandas espectrales (Tabla 3), a una resolución espacial igual a 20 m de tamaño de pixel, una resolución temporal de 26 días y un recubrimiento de la escena de 113 km de ancho. Estas imágenes son muy útiles para la producción cartográfica de grandes superficies.

Tabla 3. Características de las bandas espectrales del sensor CBERS-2

Camara-Banda de Imagen	Valor Rango Espectral.
CCD-Banda 1	0,45 - 0,52 µm (azul)
CCD-Banda 2	0,52 - 0,59 µm (verde)
CCD-Banda 3	0,63 - 0,69 µm (rojo)
CCD-Banda 4	0,77 - 0,89 µm (infrarojo cercano)
CCD-Banda 5	0,51 - 0,73 µm (pancromática)

Fuente: Portal Web INPE <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

5.1.3 Herramientas Open Source

La selección de herramientas SIG y utilidades a emplear en el proyecto se basó en primer lugar en que estas fueran open source. Igualmente se buscó que tuvieran una interfaz útil, sencilla y amigable, permitiendo procesar el mayor

número de formatos de archivos tanto de entrada como de salida desde el punto de vista de la interoperabilidad e intercambio de información a través de la publicación cartográfica. Posteriormente después de varias pruebas entre diferentes softwares se optó por trabajar con las herramientas de gvSIG 1.11, QGIS 1.8 (Quantum GIS) y Spring 5.6. (Sistema de Procesamiento de Información Georreferenciada).

GvSIG, desarrollado por la Consejería de Infraestructuras y Transporte de la Generalidad Valenciana – España (gvSIG, 2011), es un cliente pesado con capacidad de conexión a servidores WMS, WFS y WCS permitiendo la integración con datos almacenados localmente. Esta herramienta se empleó en el tratamiento vectorial de la información, concretamente para georreferenciar y actualizar tanto la información de la cartografía básica local así como la información temática de vegetación y usos de suelo.

QGIS por su parte, es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License. Es un proyecto oficial del Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). El software actualmente se ejecuta desde plataformas Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android. QGIS admite diversos formatos y funcionalidades de datos de tipo vectorial y ráster, así como también soporta diferentes tipos de bases de datos. Permite visualizar, gestionar, editar y analizar datos y diseñar mapas. Básicamente se ha desarrollado usando el kit de herramientas Qt y C++. Esto significa que QGIS es ligero y tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) agradable y fácil de usar. Entre algunas de las características principales de QGIS se encuentra el hecho que incorpora la biblioteca GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), con lo cual se pueden manejar gran variedad de formatos de datos raster, así como también permite la automatización por lotes de procesos cartográficos. Dicha herramienta, fue empleada para la edición topológica de los elementos del terreno.

Por último, la solución Spring (Sistema de Procesamiento de Información Georreferenciada) desarrollada por el INPE Brasil, tiene la capacidad de integrar las representaciones de datos matriciales y vectoriales bajo un único ambiente. Presenta una interfaz clara y muy bien ordenada. Spring, consta de

dos módulos: Escarta e Impima. Escarta permite la elaboración e impresión de mapas mientras que Impima permite gestionar los distintos formatos de archivos SPG (Spring Gridded binary), a través de la lectura de la imagen almacenada (Camara, et al 1996). Dicha herramienta fue necesaria para procesar las imágenes de satélites.

VI. METODOLOGIA



6 MAPEO DE USO DEL SUELO A PARTIR DE IMÁGENES DE SATELITES APPLICANDO DIFERENTES ALGORITMOS DE CLASIFICACION

6.1 Metodología Aplicada

La Figura 20 presenta el flujo de desarrollo para la realización de la presente Tesis Doctoral. El trabajo comenzó con la localización e identificación de las fuentes de información geográfica de interés sobre las que se hizo un primer análisis e interpretación. Posteriormente se trabajaría con cada una de las fuentes tanto en un entorno vectorial como raster con objeto de generar un conjunto de productos cartográficos los cuales serían sometidos a un control de calidad. Una vez validada la calidad de los mismos éstos permitieron ser analizados para una mejor gestión del territorio.

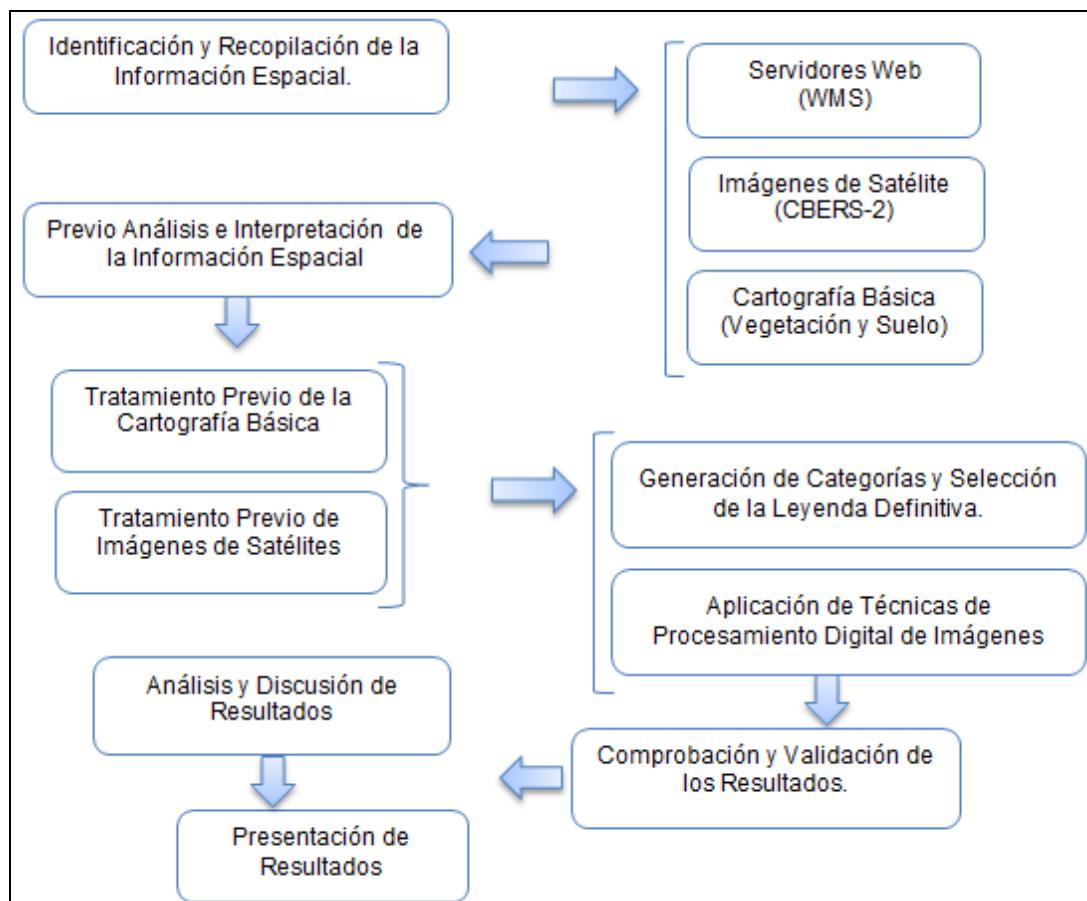


Figura 20. Esquema metodológico (Fuente: Elaboración propia).

6.2 Identificación y recopilación de la información Espacial

En la actualidad el material cartográfico además de obtenerse en papel también se obtiene mediante la aplicación de computadoras las cuales han originado una amplia gama de productos cartográficos. Además el desarrollo tecnológico ha tenido un gran impacto en la forma de obtener la información con la aparición de la fotogrametría digital, sensores remotos, sistemas de navegación global por satélite (GNSS), etc.

El desarrollo tecnológico en las telecomunicaciones, la computación y principalmente Internet ha alcanzado diversos ámbitos y actividades del ser humano. En este sentido, el WWW ha logrado impactar notablemente en la forma en que desarrollan sus actividades los gobiernos, las instituciones civiles, las empresas, y en general con más presencia en la vida cotidiana del ciudadano. La red se ha convertido en el elemento crítico de infraestructura tecnológica para adquirir y distribuir información cartográfica georreferenciada así como para presentar y comercializar datos espaciales. Sin embargo, el éxito que han tenido los sistemas de cartografía en el Web se deben de una u otra forma a su disponibilidad gratuita para ser descargada o visualizada, su facilidad de uso al no requerir de programas especiales o comerciales y la capacidad que presentan para responder casi instantáneamente a los requerimientos del usuario final. Debido al constante cambio tecnológico y uso a que están sometidos los SIG en todo el mundo se hace necesaria la publicación en el web de la información geográfica, motivo por el que ha ido creciendo el interés de las instituciones del estado, empresas privadas y universidades, colaborando con el diseño para la publicación cartográfica a través de la creación portales web.

Para este estudio las herramientas open source SIG utilizadas, la información obtenida de servicios WMS, así como las imágenes CBERS-2 son un ejemplo de libre acceso de la información en la web, siendo adquiridas a través de nuevas tecnologías libres, las cuales en gran parte se han desarrollado con la finalidad de crear sistemas de publicación en línea. Un ejemplo de ello, se puede observar en el Geoportal Nacional Simón Bolívar, el cual ofrece varias capas temáticas de información cartográfica para la visualización y consulta,

como por ejemplo la capa de los principales ríos y presas de Venezuela, la capa de vegetación, la capa de áreas bajo régimen de administración espacial (ABRAES), entre otras (Figura 21).

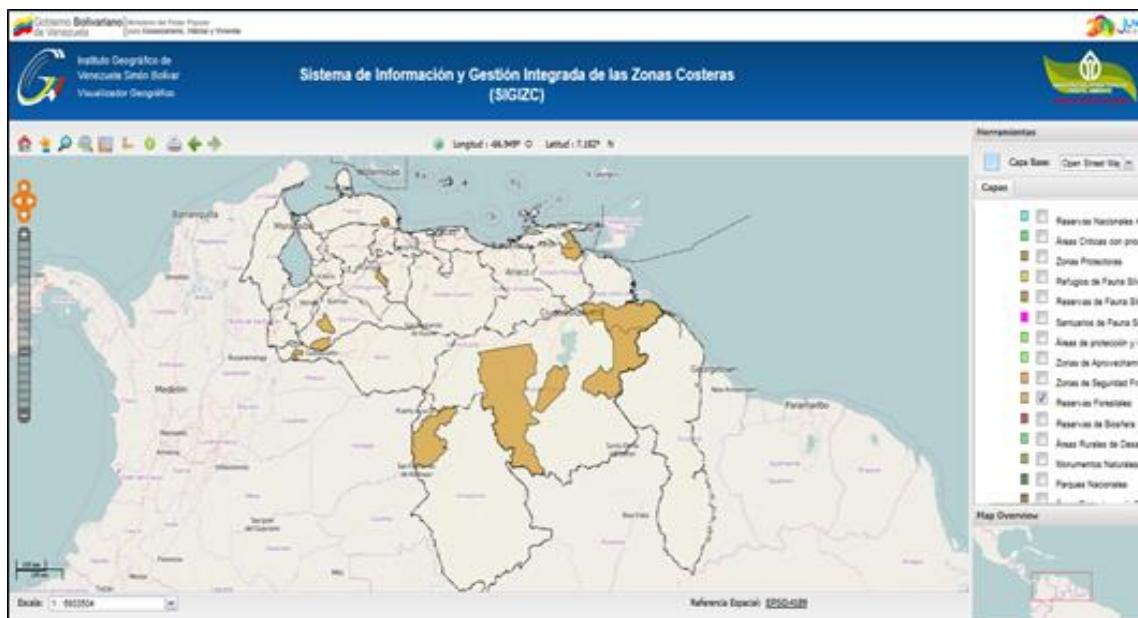


Figura 21. Geo-portal Nacional Simón Bolívar, Visualizador Geográfico SIGIZC
(Fuente: elaboración propia).

6.2.1 Servicios de Mapas Web

Las herramientas Open Source existentes actualmente y sin la necesidad de descargar material cartográfico desde Internet, permiten a través de los servicios Web como WMS, WCS, WFS trabajar de forma remota y extraer un gran volumen de información geográfica, como muestra el presente trabajo en la figura 23, donde de forma remota se extrajo información de la red de drenaje por ejemplo. Esta forma remota de trabajar es posible llevarla a cabo mediante un navegador web estándar a modo de cliente ligero haciendo una consulta del área de estudio, la cual es traducida en forma de petición URL. Otra forma remota de trabajar es acceder mediante alguna herramienta SIG de escritorio o cliente pesado, permitiendo de igual forma la consulta y visualización de la información a través de las diferentes capas que ofrece el servicio. El cliente pesado empleado para este trabajo fue gvSIG (Figuras 22 y 23)

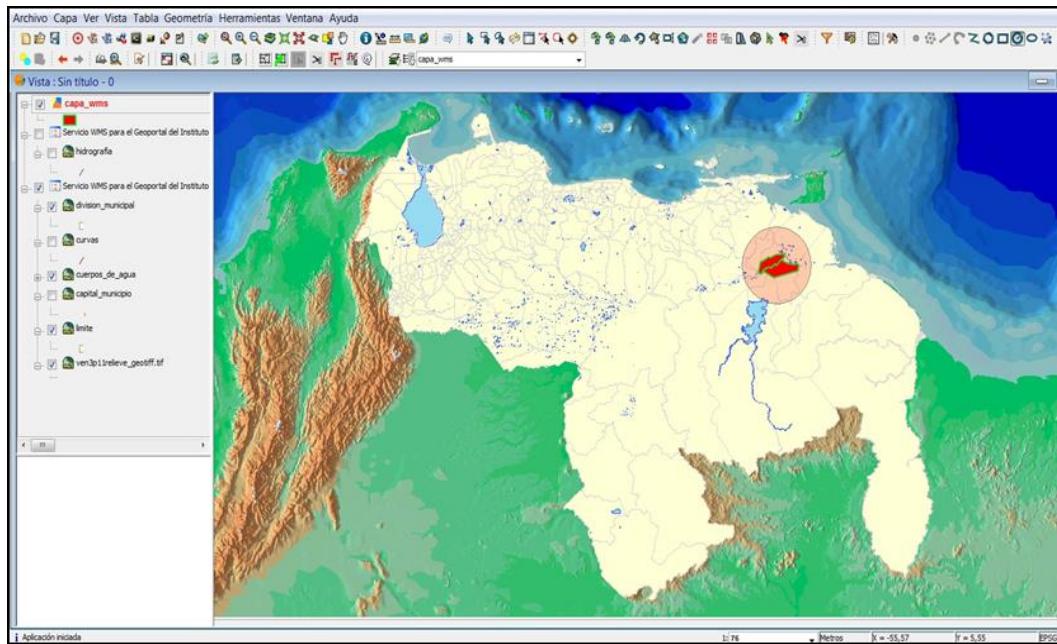


Figura 22. Identificación del Área de Estudio, gvSIG Cliente WMS (Fuente: elaboración propia).

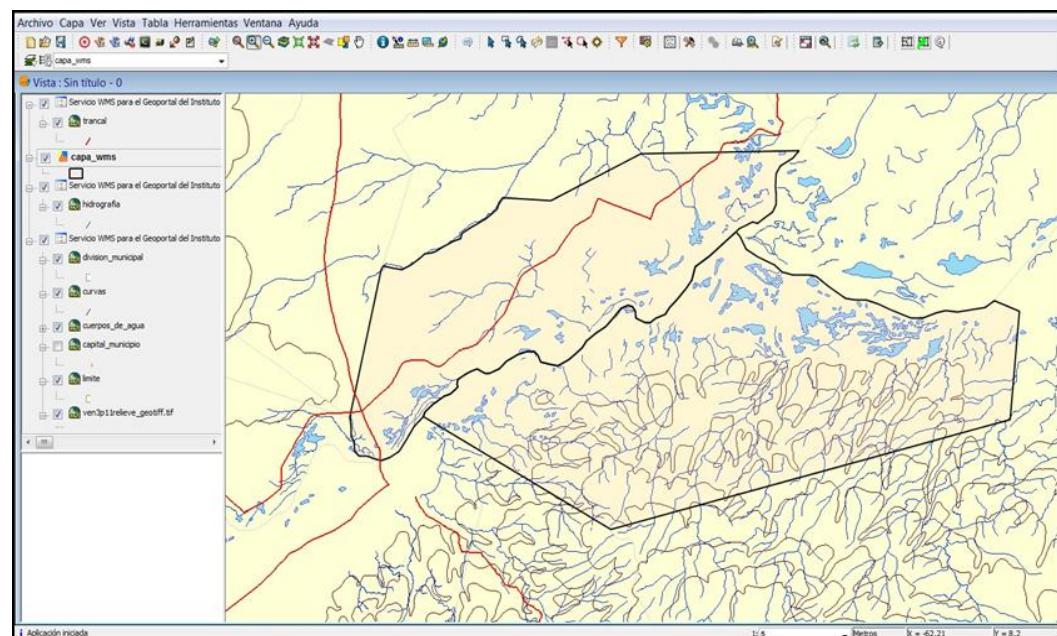


Figura 23. Acceso a información cartográfica de diversas temáticas a través de un servicio WMS (Fuente: elaboración propia)

6.2.2 Cartografía Básica, Mapa de Vegetación y Tipos de Cobertura de Suelo

El portal web *a-Venezuela.com* ofrece información estática de mapas temáticos de vegetación, suelos, geología, límites administrativos (estatales y municipales), etc. de toda la República Bolivariana de Venezuela a gran escala y en formato PDF no georreferenciado.

En un primer momento en este estudio se procedió a trabajar con la cartografía básica de vegetación y tipos de suelo para ser empleada como verdad terrestre proporcionada de forma gratuita previa solicitud por escrito ante la CVG Tecmin. Dicha solicitud se hizo de manera formal a consecuencia de la escasa y desactualizada información que existe sobre la República Bolivariana de Venezuela, como mapas topográficos, mapas temáticos, fotografías aéreas, ortofoto-mapas entre otros. Una vez analizada la información, ésta fue descartada debido a su baja escala, 1/500.000, así como a la desactualización de los datos, invalidando su utilidad como información temática de verdad terrestre para validar los resultados obtenidos de la clasificación de las imágenes de satélite. Sin embargo, esta información sí fue útil como referencia para la identificación y actualización de las clases resultantes de Hidrología, Uso Urbano, Uso Forestal, Uso Agropecuario, Asociación de Bosque (denso), Bosque con Matorral, y Bosque con Gramíneas Inundable.

6.2.3 Imágenes De Satélites CEBRS-2

Las dos imágenes CBERS-2 se emplearon para a partir de la información espectral presente en cada una de las bandas discriminar y determinar los diferentes usos de suelo y tipos de cobertura en la zona de trabajo. Para ello se consideraron distintos métodos de clasificaciones supervisadas y no supervisadas, aplicando el procedimiento digital para imágenes satelitales en el software libre Spring.

6.3 Previo Análisis e Interpretación de la Información Espacial

El trabajo se desarrolló en dos fases. En la primera se aplicó un tratamiento previo de la cartografía básica con objeto de georreferenciar y vectorizar ésta y

en la segunda se procedió al tratamiento digital de imágenes de satélite con objeto de mejorar algunos aspectos visuales de ciertos elementos estructurales para su análisis.

6.3.1 Tratamiento Previo de la Cartografía Básica

La cartografía básica, suministrada en formato PDF, fue editada y transformada al formato de imagen JPG considerando una resolución de 300 puntos por pulgada (dpi). Posteriormente fue georreferenciada empleando el software gvSIG en su versión 1.10. Los puntos de control terrestre (PCT) fueron obtenidos tomando como referencia las intersecciones de algunos cauces de río y del cruce de coordenadas de la cartografía básica local y la información geográfica proporcionada por la IDEVEN. Asimismo, para una mejor visualización e identificación, se optó por cargar la imagen CBERS-2 como fondo cartográfico.

El proceso de georreferenciación se llevó a cabo considerando el sistema de referencia de coordenadas WGS84 (World Geodetic System 1984), proyección UTM huso 20, hemisferio Norte. Se establecieron un mínimo de diez puntos de control terrestre (PCT), los cuales fueron seleccionados y distribuidos de forma homogénea cubriendo toda el área de estudio. Posteriormente mediante la aplicación de una transformación de coordenadas por el modelo de transformación polinómica de segundo grado y empleando como remuestreo el método del vecino más cercano, se transformó el sistema de referencia de coordenadas de la información geográfica siguiendo la metodología definida en Lozano (2006). La figura 24, representa el proceso de georreferenciación de la cartografía básica (derecha) con el servicio WMS e imagen (a la izquierda), mediante PTC.

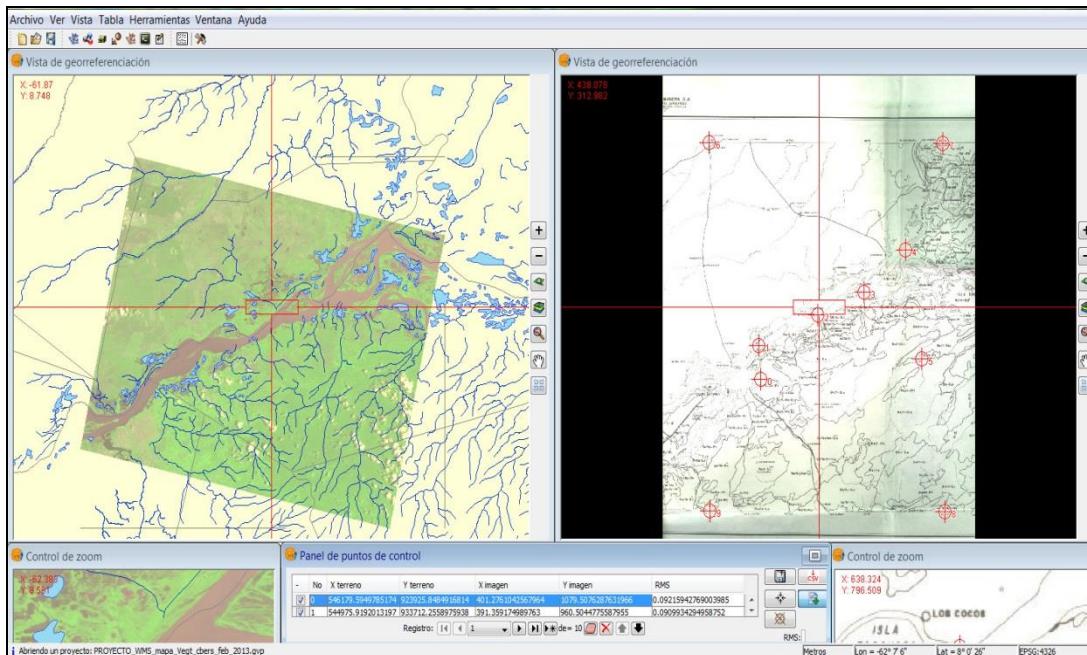


Figura 24. Cartografía Básica Georreferenciada (Fuente: elaboración propia).

6.3.2 Identificación de Categorías/Clases de Cobertura de Suelo

Una vez georreferenciada la cartografía básica, se procedió a identificar las distintas categorías y/o clases de cobertura de suelo, teniendo en cuenta un amplio conocimiento de la zona de estudio, se dedujeron siete clases temáticas que corresponden a Hidrología (A1), Uso Urbano (B2), Uso Forestal (C3), Uso Agropecuario (D4), Asociación de Bosques (E5), Bosque y Matorral (F6) y Bosque con Gramíneas Inundable (G7). Posteriormente se digitalizaron en pantalla las entidades graficas correspondientes a la red de drenaje, vías de comunicación y curvas de nivel, todas ellas a partir de información publicada a través de servicios WMS, fijando en este caso los parámetros inherentes al proceso de edición como snapping y flatness, respetando además las convenciones establecidas en la asignación temática de colores (Chuvieco, 2007a).

El proceso de digitalización para generar las entidades graficas de red de drenaje, vías de comunicación y curvas de nivel, implicó la configuración de las propiedades de edición snapping y flatness, es decir, unión de vértices y suavizado de líneas respectivamente. En el primer caso, llamado también “Snap tolerante” éste valor se fijó igual a 5 pixels, es decir, los vértices (nodos)

colgantes que conforman cada línea y se encuentren a una distancia igual o menor de 5 pixels se unirán en una coordenada común. Para el segundo caso, se consideró que una circunferencia o cualquier geometría curva están formadas por tramos rectos. Para ello el número que se especifica para el parámetro flatness representa el tamaño máximo de estos tramos fijándose en este estudio un el valor igual a 0.8 metros, es decir, tiene la función de suavizar las líneas de una entidad.

6.3.3 Tratamiento previo aplicado a las imágenes de satélites

Las dos imágenes CBERS-2 fueron suministradas ya ortorectificadas y geométricamente corregidas por lo que no fue necesario georreferenciarlas. Ambas imágenes con sus respectivas bandas espectrales para poderlas procesar en Spring, fueron necesariamente registradas en el módulo Impima. Posteriormente se incorporaron a Spring como imágenes georreferenciadas con las bandas espectrales 1, 2, 3 y 4 correspondientes a las regiones del Rojo, Verde, Azul, la banda del infrarrojo cercano y la banda 5 igual al canal pancromático. Esto permitió generar y visualizar a nivel de detalle una composición en color verdadero. Posteriormente se realizaría un mosaico para representar toda el área de estudio empleando para ello el método de interpolación bilineal a fin de unir ambas imágenes en una sola y única imagen. A continuación se aplicó una máscara a la imagen mosaicada para excluir aquellas áreas ajena al área de trabajo. Sobre este nuevo producto resultante se aplicaron las técnicas de clasificación digital de imágenes a partir de la combinación de las distintas bandas espectrales para extraer los diferentes usos de suelo y tipos de cobertura en la zona de trabajo.

6.4 Técnicas de procesamiento digital de Imágenes

El procedimiento aplicado a las imágenes CBERS-2 implicó el uso de técnicas avanzadas de procesamiento digital de imágenes. El sensor al recibir la radiación procedente de la superficie terrestre lo almacena como un número entero, representando un determinado valor de nivel digital (ND) a partir del cual se puede obtener nuevamente la radiación recibida. La resolución

radiométrica de cada una de las bandas fue igual a 8 bits, es decir, con valores de 256 niveles de energía para captar la escena en cada canal.

En ocasiones, y dependiendo de los objetivos que se persigan con el empleo de la teledetección, puede ser suficiente trabajar con los ND georreferenciados y ortorectificados. Por tanto, en este estudio se consideró realizar la georreferenciación de la imagen y llevarla a su nueva posición geográfica, puesto que por otra parte ya estaban ortorectificadas y radiométricamente corregidas, conservando los valores de los píxeles originales, ya que en el proceso de clasificación el algoritmo mediante técnicas estadísticas emplea los valores de los ND de los píxeles para asociarlo a una determinada clase o categoría temática (Chuvieco, 2007a).

De forma convencional se divide el análisis de las imágenes digitales en dos fases las cuales comprenden un análisis visual y un análisis digital. En el primer caso, las tareas a realizar son similares a la fotointerpretación clásica con las ventajas que ésta aporta en cuanto a las posibilidades de retocar y realzar las imágenes. En algunos casos, pueden aparecer zonas muy saturadas o con poco contraste, dificultando la interpretación de las mismas. Para ello se hace necesario aplicar técnicas que permiten resaltar determinados aspectos que faciliten estos trabajos de fotointerpretación como la ecualización del histograma, la cual tiene en cuenta no sólo los ND sino también su frecuencia de manera que aquellos valores de ND más frecuentes resultarán más ajustados que los menos frecuentes.

Las imágenes obtenidas a partir de sensores remotos, constituyen un tipo particular de dato por medio del cual se deriva gran volumen de información. Las operaciones de extracción de información, se realizaron de forma automatizada mediante el software Spring, aplicando distintos algoritmos de clasificación digital. La naturaleza del análisis automatizado es fundamentalmente cuantitativa, incorporando formulaciones estadísticas basadas en los valores digitales de las distintas bandas de la imagen que se recogen en cada píxel, lo cual expresan la reflectividad de cada uno de los elementos del terreno para cada longitud de onda dada (Chuvieco, 2007a).

La Figura 25 muestra un gráfico correspondiente a la curva de reflectividad de algunos de los cubiertas presentes en el territorio. En ella se puede observar como una vegetación sana absorbe la mayor parte de la radiación en el rango del visible y refleja una buena parte en la región del infrarrojo cercano del espectro (Kiptala. et. al., 2013). Por otra parte, la nieve (cuerpo blanco) refleja a unos niveles muy altos tanto en el rango del visible como del infrarrojo cercano. Caso contrario el agua, que absorbe gran parte de la radiación de onda, tanto en la región visible como en el infrarrojo. La curva espectral del suelo es mucho más plana que la curva de vegetación, debido a los factores que influyen en su reflectividad como el contenido de materia orgánica, humedad, textura, rugosidad superficial, etc. Estos factores se relacionan entre sí, lo que implica una reflectividad variable, por ejemplo, suelos con un alto contenido de humedad presenta una reflectividad baja y los suelos con textura más gruesa, tienden a absorber radiación y en consecuencia se ven oscuros.

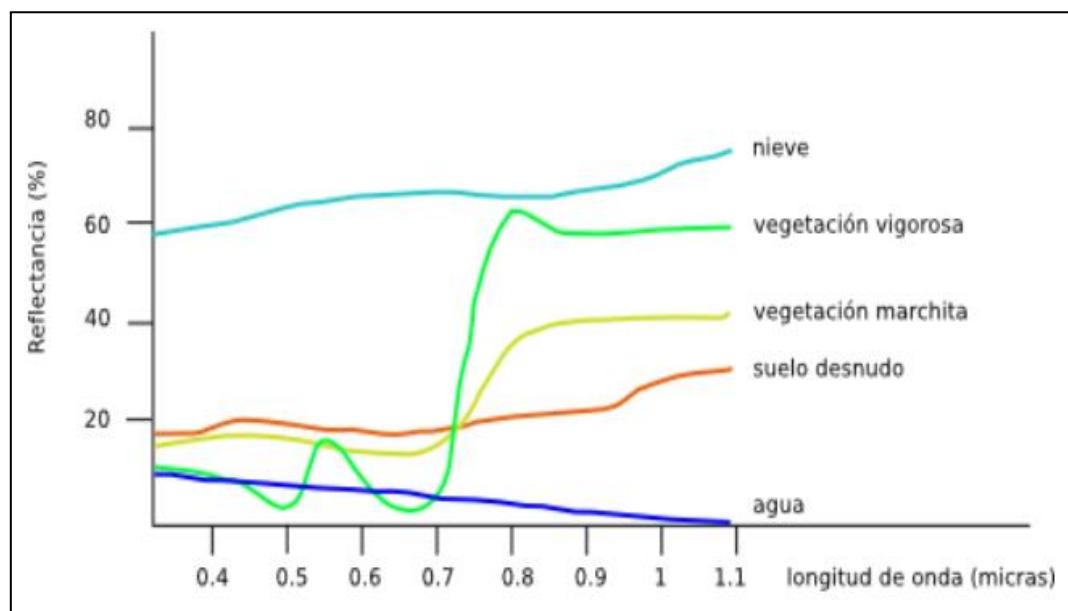


Figura 25. Firmas espirales tipo de algunos elementos habituales (Fuente: Olaya, 2014).

En el caso del análisis digital, la clasificación estadística es el procedimiento convencional del análisis digital de imágenes, puesto que constituye un proceso de análisis de los valores de píxeles. Sin embargo, se emplearon

técnicas de segmentación de imágenes como fase previa a la fase de clasificación digital y por ende a la fase de entrenamiento. Esta técnica consiste en generar regiones cerradas del área de interés de la imagen en función de dos parámetros empleados, similitud y área, posteriormente se aplicó el operador de clasificación digital a fin de discriminar entre las diferentes categorías de uso de suelo presentes en la escena.

La clasificación digital implica categorizar una imagen multibanda. En términos estadísticos esto supone reducir la escala de medida de una variable continua de valores de ND originalmente generados por el sensor a una escala categórica de clases. Asignando los píxeles originales de una imagen a un conjunto de categorías dependiendo del ND. Las clases informacionales describirán los tipos de cubierta presentes en la imagen.

Se suelen distinguir dos tipos de clases al momento de realizar una clasificación temática; las informacionales y las espectrales. Las primeras se corresponden con la leyenda de trabajo que pretende deducir el usuario y son previamente establecidas por el mismo, mientras que la segunda se corresponde a grupos de valores espectrales homogéneos dentro de la imagen y se deducen de los ND presentes en la misma. El caso ideal supone producir una correspondencia biunívoca entre las dos, es decir, que a cada clase de cobertura le corresponda un único grupo espectral, y que cada grupo espectral corresponda a una sola clase temática. No obstante, este caso es poco frecuente, pudiéndose producir normalmente; que una categoría esté expresada en varias clases espectrales, o que dos categorías informacionales compartan una sola clase espectral.

Existen dos tipos principales de clasificación digital de imágenes desde el punto de vista estadístico la clasificación no supervisada y supervisada. En el primer tipo el usuario fija el número inicial de clases que desea obtener y no requiere conocimiento previo de la zona de estudio. El algoritmo de clasificación asigna los píxeles automáticamente a las distintas clases en base a criterios estadísticos. Por el contrario, los métodos de clasificación supervisada si es necesario tener un conocimiento previo de la zona de estudio siendo el usuario quien identifica y selecciona muestras representativas de cada categoría para

entrenar y guiar al clasificador en su proceso de discriminación de clases de uso de suelo.

A los efectos del presente trabajo se aplicaron y compararon diferentes métodos de clasificación supervisada empleando clasificadores pixel a pixel y clasificadores por regiones obtenidas del proceso de segmentación. Los algoritmos de clasificación pixel a pixel únicamente utilizan la información espectral de cada pixel para encontrar regiones homogéneas, siendo el resultado final una imagen digital que constituye un mapa de píxeles clasificados, representado por símbolos gráficos y colores. Por otro lado, el algoritmo de clasificación por regiones, además de utilizar la información espectral de cada pixel utiliza la información espacial mediante la segmentación de la imagen lo que implica la relación entre los píxeles y sus vecinos. Estos clasificadores procuran simular el comportamiento de un fotointerprete, al intentar reconocer áreas homogéneas.

El procesamiento digital de las imágenes CBERS-2 implicó las etapas de segmentación, entrenamiento y clasificación con el objeto de comparar los diferentes métodos de clasificación supervisada. Para ello se realizó en primer lugar una clasificación no supervisada mediante el algoritmo ISOSEG con la finalidad de visualizar la distribución de las clases resultantes e identificar posibles áreas homogéneas. Se trata de un algoritmo de agrupamiento de datos no supervisados por atributos estadísticos (media, matriz de covarianza y área) sobre un conjunto de regiones producto de una segmentación. No necesita de ningún conocimiento previo de la distribución de densidad de probabilidad de las categorías, procurando agrupar regiones a partir de una medida de similaridad entre ellas. La Figura 26 muestra gráficamente la lógica del algoritmo ISOSEG. Éste, sobre la diagonal que atraviesa el espacio de atributos establece tantos puntos como clases deseadas. Posteriormente se calcula la distancia desde los valores medios de estos puntos a cada elemento en la primera iteración, en este caso los centros de las clases no se corresponden con los centros de los grupos presentes en el conjunto de elementos, pero su distribución sobre el espacio hace que estos centros puedan moverse al lugar correcto en sucesivas iteraciones donde las clases

definidas presenten poca variabilidad. Sobre este resultado se elaboró un primer mapa vectorial el cual se utilizó de apoyo para actualizar la cartografía básica de vegetación e identificar posteriormente las diferentes clases.

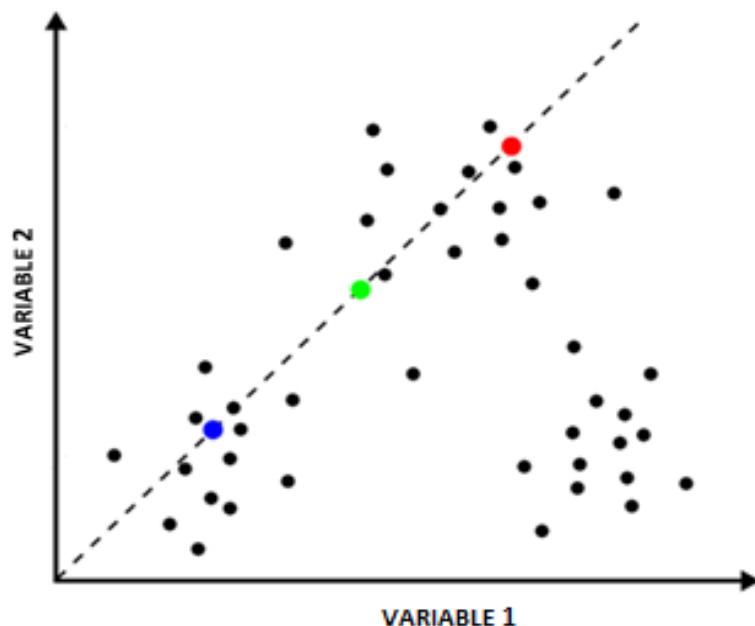


Figura 26. Algoritmo de clasificación No supervisado ISOSEG. (Fuente: Olaya, 2014).

6.4.1 Método de Segmentación de Imágenes

De todas las técnicas posibles se empleó el método de crecimiento por regiones por el cual se generan regiones cerradas como un conjunto de píxeles contiguos dispersados bidireccionalmente. El método emplea los parámetros similitud (S) y área de píxel (Ap). La similitud se basa en la distancia Euclídea entre los valores medios de niveles de gris mientras que el parámetro Ap se corresponde con la mínima superficie que puede tener una región, siendo definida por el número de píxeles unidos. Dos regiones se consideran diferentes si la distancia entre sus valores medios es superior al límite de similitud escogido (Conde *et al.*, 2009). Posteriormente, y a fin de lograr buenos resultados en este proceso, se combinaron diferentes valores de similitud con diferentes valores de área de pixel.

Esta técnica de segmentación realiza un agrupamiento de datos, es decir, sólo las regiones adyacentes espacialmente, tienen la probabilidad de ser unidas.

Inicialmente este proceso de segmentación bordea a cada pixel como perteneciente a una región diferente. Seguidamente se calcula un criterio de similitud para cada par de regiones adyacente espacialmente. Por tanto, el proceso divide la imagen en un conjunto de sub-imágenes o regiones acordes con el parámetro área de píxel previamente establecido por el usuario y finalmente realiza la unión de las regiones, según el umbral de agregación o similitud definido.

6.4.2 Identificación y Selección de Áreas de Entrenamiento

Esta etapa consistió en editar las muestras necesarias para entrenar al clasificador supervisado. Para ello se identificaron y seleccionaron las muestras más representativas de cada una de las clases obtenidas con las imágenes CEBRS-2. A fin de uniformizar el proceso para los diferentes operadores de clasificación se empleó las mismas regiones generadas por la segmentación como contorno de cada uno de los temas. El archivo generado en el proceso de entrenamiento se guardó en formato shapefile desde gvSIG y posteriormente se importó a Spring donde fue utilizado con cada uno de los clasificadores empleados tratando en todo momento de mantener una equidad en los procedimientos al momento de compararlos.

En el proceso de entrenamiento del sistema se calcula las estadísticas elementales de cada categoría (media, rango, desviación típica, matriz de varianza-covarianza) a partir de los NDs de todos los pixeles incluidos en las áreas de entrenamiento. Este cálculo se aplica a todas y cada una de las bandas que intervienen en el proceso de clasificación. Se asume que las áreas de entrenamiento son fieles representantes de las distintas categorías, por lo tanto, las medidas extraídas de sus NDs definen dichas clases y de ahí la necesidad de una correcta selección para poder discriminar las categorías correctamente.

La selección de áreas de entrenamiento requiere de algunos criterios estadísticos que garanticen el grado de representatividad de las distintas categorías. El proceso implica el criterio para elegir el tamaño y la distribución más idónea de las muestras, ya que dependen en gran medida del grado de

variabilidad que pueda presentar cada clase. Se requiere seleccionar un mínimo de $m + 1$ pixeles por categoría, siendo m el número de bandas que integran el análisis, no obstante se ha intentado superar este límite por lo que se recomienda seleccionar un conjunto de pixeles como área de entrenamiento de entre 10 y 100, equivalentes a una superficie aproximada de 200 y 2000 m² por categoría, considerando el tamaño de pixel de la imagen de 20 m, es decir de 400 m² cada uno (Chuvieco, 2007a). Con este tamaño de pixel, se generaron un conjunto de puntos de polígonos de 20 pixeles por cada lado, como muestras de entrenamiento dentro del contorno de cada región, lo cual representa un área mínima de 160000 m², equivalente a 16 hectáreas. El motivo de este redimensionamiento es debido a que se trata de clasificar superficies mayores de 16 hectáreas como es el caso de caracterización de cobertura y uso suelo, ya que representan áreas más homogéneas para la discriminación entre categorías o clases.

6.4.3 Fundamentos de los algoritmos de clasificación digital de imágenes.

En la clasificación supervisada se asigna a cada pixel de la imagen una de las clases definidas con antelación por el usuario a partir de las firmas espectrales establecidas en los campos de entrenamiento. Estos campos de entrenamiento deben ser áreas lo más homogéneas posibles dentro de cada clase y de gran heterogeneidad entre clases. De este modo el algoritmo asigna a cada pixel de la escena la clase a la que pertenece en función de una función de similitud. Los clasificadores empleados en el presente trabajo han sido el algoritmo de Bhattacharya, el algoritmo Maxver Máxima Verosimilitud y el algoritmo por Distancia Mínima o Euclidea.

El clasificador Bhattacharya es un algoritmo de clasificación de imágenes que mide la separabilidad estadística entre clases espectrales a partir de la estimación de una función de densidad de probabilidad para las clases definidas por el entrenamiento. Posteriormente evalúa en cada región la distancia de Bhattacharya entre las clases, es decir, mide la discrepancia entre ambas poblaciones por lo que es en realidad una medida de divergencia entre dos distribuciones multinomiales (Cámara, et al., 1996 y Dos Santos, et al.,

2010). Los lados de un paralelepípedo vienen representados por la media de cada variable en la clase y su desviación típica. La longitud de los lados es igual a dos veces la desviación típica, y se encuentran centrados en la media. Los puntos representados son elementos que se quieren clasificar en las tres únicas clases, uno por cada celda. Esto supone que se utilizan dos variables para efectuar la clasificación, representado por un gráfico bidimensional. En este método, los elementos que no estén dentro del paralelepípedo no podrán ser clasificados como pertenecientes a una clase dada (Figura 27). La distancia de Bhattacharya viene expresada como (Eq. 1):

$$B(pi, pj) = \frac{1}{2}(m1 - m2)^t \sum (mi - mj) + \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \sum (mi - mj) \right|}{\left| \sum i \right|^{1/2} \left| \sum j \right|^{1/2}} \quad \text{Eq. 1}$$

Siendo B la distancia de Bhattacharya, Pi e Pj los píxeles de la clases i y j, mi y mj el promedio de clases i y j, y finalmente i y j las clases dentro del contexto.

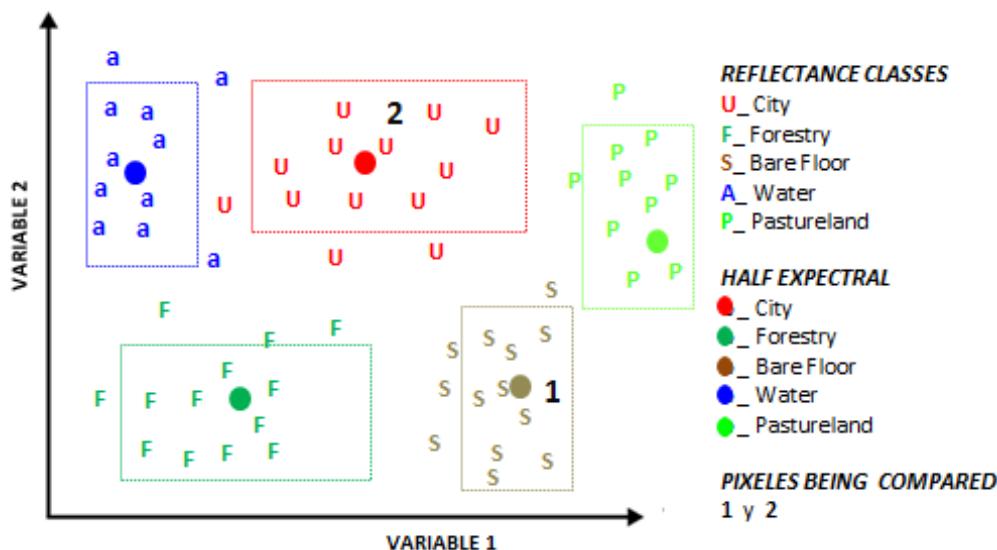


Figura 27. Algoritmo de clasificación supervisada Bhattachary (Fuente: Cámara, et al., 1996).

Éste algoritmo opera de forma iterativa mediante la agrupación de un conjunto de píxeles vecinos de valores muy similares entre sí (regiones como contorno en el entrenamiento del sistema), pero con diferentes valores de píxeles entre sus grupos (Bhosle y Pawar, 2013).

El clasificador Maxver (Máxima Verosimilitud o máxima probabilidad) es uno de los métodos de clasificación basados en pixel más ampliamente utilizados en el procesamiento digital de imágenes. Considera la ponderación de las distancias entre medias de los niveles digitales de las clases, utilizando parámetros estadísticos de media y desviación típica que caracterizan a una clase (Payacan y Formaggio, 2005). Supone una distribución normal de valores de densidad de probabilidad de los pixeles de cada clase. De este modo, cada tipo de cubierta pueda ser descrita por una función de probabilidad, asignando pixeles a aquella clase que maximice dicha función. Además es posible aplicar un umbral inferior a los valores de probabilidad, de tal forma que si la clase más probable tiene un valor por debajo del umbral no se asigna el elemento a dicha clase (Figura 28). El método se expresa por la ecuación (Eq. 2):

$$P_c = \left[-0,5 \log_e (\text{Det}(V_c)) \right] - \left[0,5 (X - M_c)^T (V_c)^{-1} (X - M_c) \right] \quad \text{Eq.2}$$

Siendo P_c la probabilidad que un vector X tiene de ser asignado a una clase, V_c la matriz de covarianza de clase c , contemplando todas las bandas ($k \dots L$), $\text{Det}(V_c)$ el determinante de la matriz de covarianza V_c , X el vector de medida de dos pixeles desconocidos y M_c la medida de cada clase c .

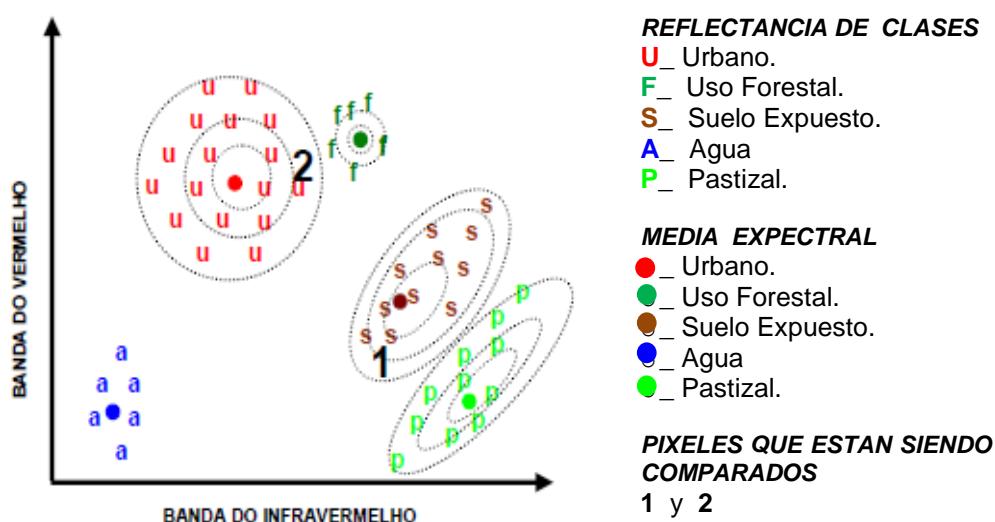


Figura 28. Algoritmo de clasificación supervisada de Máxima probabilidad (Fuente: Cámara, et al., 1996).

El algoritmo por Distancia Euclidea o de Mínima distancia es también un algoritmo de clasificación a nivel de pixel el cual utiliza la distancia para asociar un pixel a una determinada clase. El criterio más sencillo para asignar un pixel a una categoría es incluirlo en la más cercana, es decir, en aquella que reduzca la distancia entre dicho pixel y el centro de la clase, comparando la distancia espectral del ND de cada pixel con los del centro de distintas clases (Chuvieco, 2007a). Este método guarda relación con la interpolación por vecindad, en la que se asignaba el valor del punto más cercano. Esto significa que todos los elementos pueden ser clasificados, ya que con frecuencia existirá uno más cercano. Esto puede producir asignaciones falsas en el caso de que un elemento sea muy distinto a todas las clases (Figura 29). Una vez realizada la primera iteración, se estudian los puntos que están incluidos en cada clase y se calculan nuevamente los valores de las medias por clase. Con estos nuevos valores calculados de las medias, se vuelve a repetir la fase de asignación por distancia mínima, y así sucesivamente hasta que se cumpla un criterio de convergencia. En cada iteración del proceso hay elementos que pueden cambiar de clase. El número de dichos elementos que varían su clase es empleado como criterio de convergencia, estableciendo un umbral inferior. Si en una iteración el número de elementos que varían es menor que el umbral, se considera que el proceso ha convergido y se detiene (Olaya, 2014). En la clasificación cada pixel será incorporado a una clase a través del análisis de la medida de similitud de distancia Euclidea, basada en el Teorema de Pitágoras (Eq. 3):

$$DIST = \sqrt{\sum (VB_{ijk} - \bar{X}_{ck})^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Siendo DIST la distancia euclidea, VB_{ijk} el nivel digital de la fila i, columna j y banda k, X_{ck} se corresponde con el promedio de clase c, y banda k, C es el número de clase incluidas en la clasificación y K el número de bandas incluidas en la clasificación.

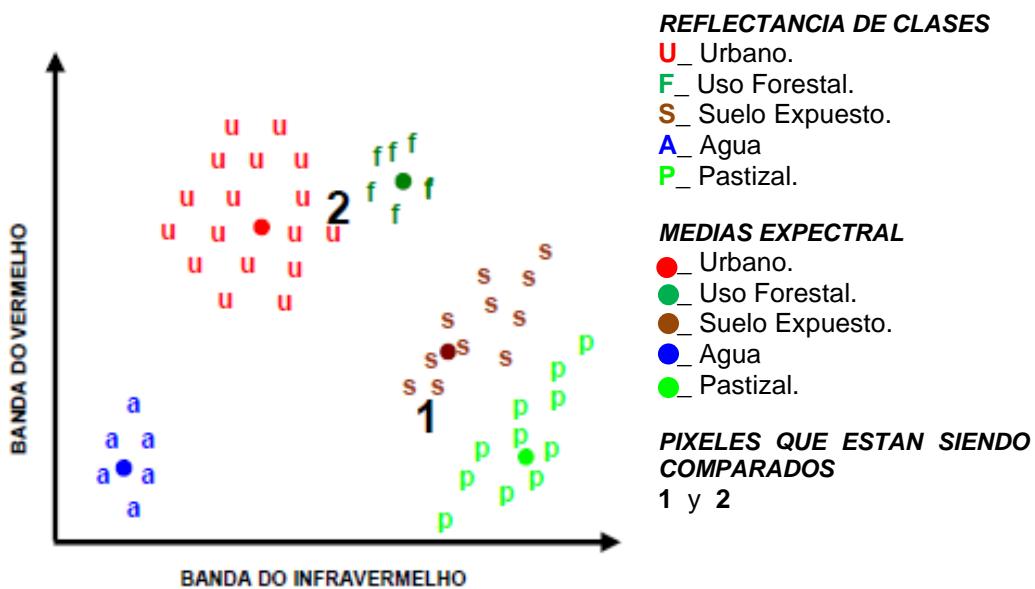


Figura 29. Algoritmo de clasificación supervisada de Mínima distancia (Fuente: Cámara, et al., 1996).

Una vez clasificadas las imágenes se procedió en cada uno de los casos a aplicar un filtro de mayoría (ventana de 5 x 5) con el objetivo de eliminar píxeles aislados dentro de un área homogénea.

6.5 Comprobación y Validación de los Resultados

En los procesos de clasificación automatizada, la matriz de error o confusión calculada a partir de los datos obtenidos para determinar la fiabilidad global de la cartografía resultante representa el procedimiento de validación más habitual en este tipo de estudio (López y Plata 2009). También permite analizar los datos para identificar patrones dominantes y sistemáticos.

La matriz de error calcula el tanto por ciento de concordancia que hay entre la imagen clasificada y las muestras empleadas como verdad terreno, es decir el número de aciertos de forma objetiva y cuantitativa expresada a través del índice kappa, con lo cual mide la bondad de ajuste y calidad de los resultados obtenidos en función del clasificador empleado. Se refiere al grado de concordancia entre las clases de los datos clasificados de la imagen y un conjunto de datos locales de referencia empleados como verdad terrestre (Macedo-Cruz et al. 2010). Éste índice kappa, tiene en cuenta los píxeles que

no han sido clasificados y que aparecen representados en la diagonal principal de la matriz de confusión. Por tanto, para evaluar de forma cuantitativa esta exactitud, se requiere realizar el cálculo de la matriz de confusión mencionada anteriormente. El índice kappa, viene determinado por (Eq. 4):

$$\hat{k} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad \text{Eq. 4}$$

Siendo r el número de filas de la matriz de error, x_{ii} el número de observaciones en la fila i y la columna i (en la diagonal mayor), x_{i+} el total de observación en la fila i (que se muestra como el total marginal a la derecha de la matriz), x_{+i} el total de observación en la columna i (que se muestra como el total marginal en la parte inferior de la matriz) y N el número total de observaciones incluidas en la matriz.

La matriz calculada sobre la base del proceso de validación cruzada, y sus respectivos valores obtenidos en la diagonal principal, donde aparecen contabilizados los pixeles correctamente clasificados de cada clase. El número de pixeles correctamente clasificados divididos por el tamaño total de la muestra dan la fiabilidad global de la clasificación, lo cual no es un indicador de exactitud para las categorías individuales. Motivo por el cual se emplean dos parámetros que permiten evaluar la exactitud de las categorías individuales:

Exactitud del usuario y la exactitud del productor del mapa se basan en un arreglo cuadrado de números dispuestos en columnas y filas que especifican el número de unidades muestrales asignadas a cada categoría, para determinar mediante el cruce de la información correspondiente a los datos clasificados y la verdad del terreno, la fiabilidad global e índice kappa global. Las columnas corresponderán al conjunto de referencia, y las filas a las clases generadas en el proceso de clasificación.

La exactitud del usuario hace referencia a los errores de exclusión (errores de omisión), se obtiene dividiendo el número de aciertos de pixeles clasificado de

una clase por el número total de pixeles de la muestras para la fila correspondiente. Por otro lado la exactitud del productor hace referencia a los errores de inclusión (errores de comisión) y se obtiene dividiendo el número de aciertos de pixeles clasificados una clase entre el número total de pixeles clasificados de la muestra en esa columna (Eqs. 5 y 6).

$$PU\% = \frac{Xii}{Xi +} * 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Siendo PU% la precisión del usuario en porcentaje, $Xi +$ los totales marginales de la fila i y Xii la diagonal de dicha fila. Esta medida muestra la probabilidad de que un píxel clasificado en el mapa verdaderamente represente esa categoría en el terreno (Story y Congalton 1986).

$$PP\% = \frac{Xii}{X + i} * 100 \quad \text{Eq. 6}$$

Siendo PP% la precisión del productor en porcentaje, $X+i$ los totales marginales de la columna i y Xii el valor de la diagonal de dicha columna. El estadístico indica la probabilidad de que un píxel de referencia sea correctamente clasificado (Jensen, 1996).

La validación a través de la matriz de error empleando el conjunto de datos locales, requiere de muestras representativa de la población a evaluar. En este caso, el número de muestras se determinaron mediante la ecuación de distribución multinomial (Eq 7), propuesta por Congalton y Green (2009). Para ello, se seleccionaron de forma aleatoria estratificada pequeños polígonos como unidad de muestreo, y se distribuyeron al azar entre las clases previamente identificadas, se consideraron las clases diferentes entre sí y de gran homogeneidad respecto a su uso (Macedo-Cruz, et al. 2010).

$$\eta = \frac{\beta \prod i(1 - \alpha / k)}{4 * b_i^2} \quad \text{Eq. 7}$$

Siendo la variable Π_i la fracción de superficie de cada clase i ; β es el coeficiente determinado mediante la distribución chi-cuadrado con un grado de libertad y $1 - \alpha/K$, que representa un 100% de la precisión, dado que k es el número de categorías o clases ($k = 7$); y b es la precisión deseada ($b=0,05$).. Posteriormente dividiendo la precisión que se desea obtener entre el número total de clases se obtuvo un valor de $1 - \alpha/K = 0,007142857$, el cual fue empleado en la función de distribución chi-cuadrado. Obteniéndose el valor de $\beta = 7,2369$ mediante interpolación de la tabla chi-cuadrada calculada sobre la base del paquete de herramientas open office a través de su hoja de cálculo. Finalmente se calculó el tamaño total de muestras sustituyendo dichos valores en la ecuación 7, mencionada anteriormente.

VII. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

7 ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

7.1 Procesamiento básico de la información espacial

7.1.1 Georreferenciación de la Cartografía Básica de Vegetación

La georreferenciación del conjunto de datos locales se llevó a cabo mediante el establecimiento de puntos de control, lo cual de acuerdo con Roset and Ramos, (2012), se seleccionaron 10 puntos bien diferenciados en el sistema de coordenadas WGS84 / UTM huso 20. Con el conjunto de coordenadas se determinaron los coeficientes de un polinomio de segundo grado obteniéndose un RMSE (Root Mean Squared Error) igual de 0,479 m. En la determinación del tamaño de pixel, se consideró la resolución de la imagen en 300 puntos por pulgada (dpi), ya que la misma ofrece una buena visualización de las clases de cobertura de suelo, ello originó que a escala de trabajo (1/25.000) cada pixel de la imagen de la cartografía básica midiera en el terreno 2,12 m, por lo que el RMSE calculado es inferior a esta. Algunos autores como Conde *et al.*, (2009) y Londoño (2012) obtienen resultados similares a la escala de trabajo empleando software bajo licencia comercial. El cálculo del error medio cuadrático, viene representado por Eq. 8:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2}{N}} \quad \text{Eq. 8}$$

El RMSE conocido como promedio de los residuales, se calcula como la raíz cuadrada de las desviaciones entre los valores observados y los estimados por la regresión, tanto para las filas como para las columnas (Tabla 4). El valor viene representando la distancia entre sus coordenadas reales y las estimadas por la regresión (Chuvieco, 2007a).

Tabla 4. Coordenadas y RMSE registradas durante la georreferenciación

	Coordenadas Imagen		Coordenadas UTM (terreno)		
Puntos	X	Y	X Este(m)	Y Norte (m)	Error por punto / RMSE (m)
0	401.276	1079.507	546179.594	923925.848	0.304
1	391.359	960.504	544975.919	933712.255	0.422
2	634.324	851.418	564758.068	943289.328	0.151
3	822.364	770.176	581295.527	950145.046	0.096
4	989.808	622.566	595687.303	962338.805	0.068
5	1057.319	1006.275	600763.674	929525.577	0.298
6	191.548	241.738	527497.186	994861.555	0.185
7	1142.678	243.847	609919.332	994861.555	0.237
8	1152.234	1547.676	609919.332	884373.141	0.192
9	192.665	1545.365	527497.186	884373.141	0.337
				TOTAL	0,479

7.1.2 Georreferenciación de la información satelital

Las imágenes CBERS-2 estaban georreferenciadas, sin embargo fue necesario registrarlas en el módulo Impima para poder trabajar con ellas en Spring. Para ello, se cargaron en Impima y se verificaron sus propiedades. Luego se importaron en Spring como imágenes registradas, empleando las coordenadas del archivo de texto que traen de manera adjunta a la imagen al momento de descargarlas y aplicando el método de ajuste de polinomio para georreferenciar la imagen. Se localizaron los vértices de la imagen asignando las coordenadas correspondientes a cada vértice, empezando por la esquina superior izquierda determinando posteriormente el RMSE con un valor igual a 0.005 pixeles, lo cual es inferior al tamaño de pixel de la imagen original.

7.2 Análisis estadístico de resultados de imágenes CBERS-2

La primera clasificación de la escena se llevó a cabo inicialmente con el método de clasificación no supervisado. Para ello se generaron 26 clases iniciales o grupos distintos, algo superior del doble establecido por el conjunto de datos locales. Esta clasificación preliminar sirvió de base estadística para un

mejor ajuste en la clasificación supervisada. Los diferentes tipos de cobertura del suelo se identificaron según conocimientos previos de la zona de estudio. También se identificaron otras clases de cobertura como por ejemplo, bosques inundables o bosques de galería, basados en la información de sus características y patrones de ubicación.

El método de clasificación supervisada permitió obtener resultados acorde con la información del conjunto de datos locales, es decir, que de los 26 grupos iniciales de tipos de uso y cobertura del suelo, se redujeron a una clasificación final de 7 clases, las cuales son: hidrología (A1), uso urbano (B2), uso forestal (C3), uso agropecuario o agrícola (D4), asociación de bosques (E5), bosque y matorral (F6) y bosque bajo de sabana y gramínea inundable (G7). Se estimó un tamaño total de muestras de aproximadamente 723 puntos para entrenar/guiar a los clasificadores en su labor y se determinaron las muestras correspondientes a cada clase con un nivel de confianza de 95% y una precisión de 5%. En consecuencia el total de muestras por categoría, se vio afectado por el total de aciertos entre uno y otro método de clasificación. Los resultados de este estudio no concuerdan con los obtenidos por Vorovencii y Muntean (2013), al afirmar que el número total de muestras se mantiene, cuando en realidad se ven afectados por el tipo de algoritmo de clasificación empleado, porque trabajan de forma diferente, lo que ocasiona en cada caso que se genere un pequeño grupo de píxeles aislados no clasificados.

Las Tablas 5, 6 y 7 presentan las matrices de confusión de cada operador de clasificación empleados y la Tabla 8 resume la fiabilidad global y el índice Kappa de cada una de ellos. De todos los operadores de clasificación empleados el algoritmo de Bhattacharya proporcionó un mayor grado de separabilidad. La Tabla 5 presenta la matriz de confusión del control de calidad temático realizado para el operador Bhattacharya. En ella se observa una mejor concordancia entre las clases clasificadas y el conjunto de datos locales respecto a los algoritmos de clasificación de máxima verosimilitud y distancia Euclidea, presentando un índice de fiabilidad global de 83,93% y un índice Kappa de 0,81%. Por otro lado, el algoritmo de Máxima verosimilitud obtuvo una fiabilidad global de 73,36% y un índice kappa de 0,69% (Tabla 6).

Finalmente, el algoritmo de Distancia Euclidea presentó una fiabilidad global e índice kappa de 67,17% y 0,61% respectivamente (Tabla 7), siendo uno de los resultados más bajos obtenidos de fiabilidad global e índice kappa en la clasificación (Tabla 8). Si bien es cierto que algunos de estos métodos de clasificación supervisada se venían aplicando desde hace ya varios años, también es cierto que su ejecución procedía en gran parte de software no libre como por ejemplo en los trabajos de Kiptala. *et al.*, (2013) el cual emplea el software ERDAS Imagine en la clasificación de cobertura de suelo usando la variabilidad fenológica con imágenes Modis, Gartzia (2013) que utiliza ArcGIS versión 9 en el mejoramiento de la precisión de la clasificación en zonas de montañas Bonet *et al.*, (2014) utilizando Matlab y el servidor de ESRI scripts al intentar documentar modelos ecológicos y procedimientos analíticos desde la web.

Tabla 5. Matriz de confusión obtenida con el algoritmo de clasificación Bhattacharya.

Clases	Categorías o Referencias a Clases							Total Muestra	Exactitud Usuario (%)
	A1	B2	C3	D4	E5	F6	G7		
A1	95	0	0	0	0	0	2	97	97,94
B2	0	87	0	4	0	1	0	92	94,57
C3	0	0	81	14	0	0	1	96	84,38
D4	0	4	14	71	1	2	2	94	75,53
E5	0	0	0	0	64	3	0	67	95,52
F6	0	1	0	4	29	87	4	125	69,60
G7	0	2	0	2	1	2	86	93	92,47
Total Muestra	95	94	95	95	95	95	95	664	
Exactitud Productor (%)	100	92,6	85,3	74,7	67,4	91,6	90,5		

Tabla 6. Matriz de confusión obtenida con el algoritmo de clasificación Maxver
(Máxima verosimilitud).

Clases	Categorías o Referencias a Clases							Total Muestra	Exactitud Usuario (%)
	A1	B2	C3	D4	E5	F6	G7		
A1	94	0	0	0	0	0	1	95	98,95
B2	0	81	3	16	0	1	0	101	80,20
C3	0	1	53	17	0	1	3	75	70,67
D4	0	6	34	46	0	1	1	88	52,27
E5	0	0	0	3	76	8	0	87	87,36
F6	0	1	0	2	16	52	12	83	62,65
G7	0	1	3	7	2	31	75	119	63,03
Total Muestra	94	90	93	91	94	94	92	648	
Exactitud Productor (%)	100	90	57	50,5	80,9	55,3	81,5		

Tabla 7. Matriz de confusión obtenida con el algoritmo de clasificación Mínima Distancia (Distancia Euclídea).

Clases	Categorías o Referencias Clases							Total Muestra	Exactitud Usuario (%)
	A1	B2	C3	D4	E5	F6	G7		
A1	95	0	0	0	0	0	2	97	97,94
B2	0	81	6	20	0	1	0	108	75,00
C3	0	0	54	17	1	1	40	113	47,79
D4	0	7	29	46	0	0	2	84	54,76
E5	0	0	0	3	68	10	0	81	83,95
F6	0	1	0	2	25	75	25	128	58,59
G7	0	5	6	7	1	8	27	54	50,00
Total Muestra	95	94	95	95	95	95	96	665	
Exactitud Productor (%)	95	86,2	56,8	48,4	71,6	78,9	28,1		

Tabla 8. Resumen de fiabilidad global e índice kappa de los distintos operadores de clasificación.

Operadores de Clasificación	CBERS-2	
	Fiabilidad Global	Índice Kappa
Bhattacharya	83,93	0,81
Maxver	73,36	0,69
Dist. Euclidea	67,17	0,61

La Figura 30 muestra los valores de exactitud del usuario y la exactitud del productor según el operador de clasificación empleado. En el primer caso, el operador de clasificación Bhattacharya se impuso ante los operadores de Máxima verosimilitud y Distancia mínima al discriminar satisfactoriamente cada una de las clases o categorías. Siendo la clase bosque y matorral (F6) la que presentó una mayor confusión, al clasificar la clase de asociación de bosques (E5) como perteneciente a dicha clase (F6), presentando un valor del 69% de exactitud.

Por su parte el operador de clasificación de Máxima verosimilitud fue el que presentó el segundo mejor comportamiento espectral para las clases de hidrología (A1), uso urbano (B2), uso forestal (C3) y asociación de bosques (E5). Presentando su peor comportamiento en las clases de bosque con gramíneas inundable (G7), bosque y matorral (F6) y uso agrícola (D4), siendo esta última clase la que presentase mayor confusión con un valor de 52% de exactitud con la clase de C3.

El operador de clasificación de Distancia mínima presentó una fuerte confusión entre las clases C3, D4 y F6, G7, en este último caso la clase de bosque y matorral (F6) presentó confusión espectral con la clase de bosque con gramíneas inundable (G7). Esta confusión tiene que ver con la humedad del suelo y su poca profundidad, es decir, suelos poco profundos y con poco contenido de humedad tienden a reflejar parte de esa energía recibida, debido a la ausencia de agua en el suelo. Indicando que gran parte de la superficie

para el momento de toma de la escena contenían un bajo contenido de humedad y poca profundidad, permitiendo una mayor reflectividad, la cual fue captada por el sensor y en consecuencia confundido con matorral.

La exactitud del productor mostró buenos resultados para las clases de hidrología (A1) y uso urbano (B2) con los tres operadores de clasificación empleados. El operador Bhattacharya clasificó muy bien los pixeles de referencia de las demás clases de uso forestal (C3), bosque y matorral (F6), y bosque con gramíneas inundable (G7). Sin embargo, este clasificador tuvo un comportamiento diferente al clasificar la clase de uso agrícola (D4) puesto que presentó confusión con la clase uso forestal (C3). Esta confusión espectral puede atribuirse a la similitud de la firma espectral de ambas clases, si se trata de superficies recién plantadas o de pocos años en el caso forestal. La dominancia espectral de la clase uso agropecuario también se vio influenciada por caminos y carreteras no pavimentadas, donde los algoritmos clasificaron tales elementos como perteneciente a dicha clase. Sin embargo, cuando se trata de discriminar áreas agrícolas de gran extensión, la precisión global de la clasificación de acuerdo con Thunnissen y Noordman (1997), Cheema y Bastiaanssen (2010), y Kiptala. et. al, (2013) puede variar en un rango de entre el 70 y el 85% independientemente del tipo de software empleado, sea éste open source o no. Por tanto la precisión global alcanzada mediante las herramientas open source para esta clase está dentro del rango de los niveles aceptables para este estudio.

El clasificador Bhattacharya por su parte, no fue tan eficiente discriminando la clase asociación de bosque (E5) respecto a los otros dos operadores de clasificación, los cuales presentaron mejor comportamiento en este caso. Siendo el operador de Máxima verosimilitud quien mostró una mejor exactitud de separabilidad de un poco más de 80%. En ambos gráficos se observa como el algoritmo de Bhattacharya presenta un buen comportamiento en cada una de las clases clasificadas. Generalmente, en el caso de la clase uso forestal suele confundirse parte del suelo desnudo destinado a plantaciones, con suelo de uso agrícola o agropecuario. Esta situación sobreestimó el área de la cobertura de uso agrícola con los algoritmos de clasificación Bhattacharya, Máxima

verosimilitud y Distancia mínima con valores de 14,55%, 15% y 13,69% respectivamente (Tabla 9).

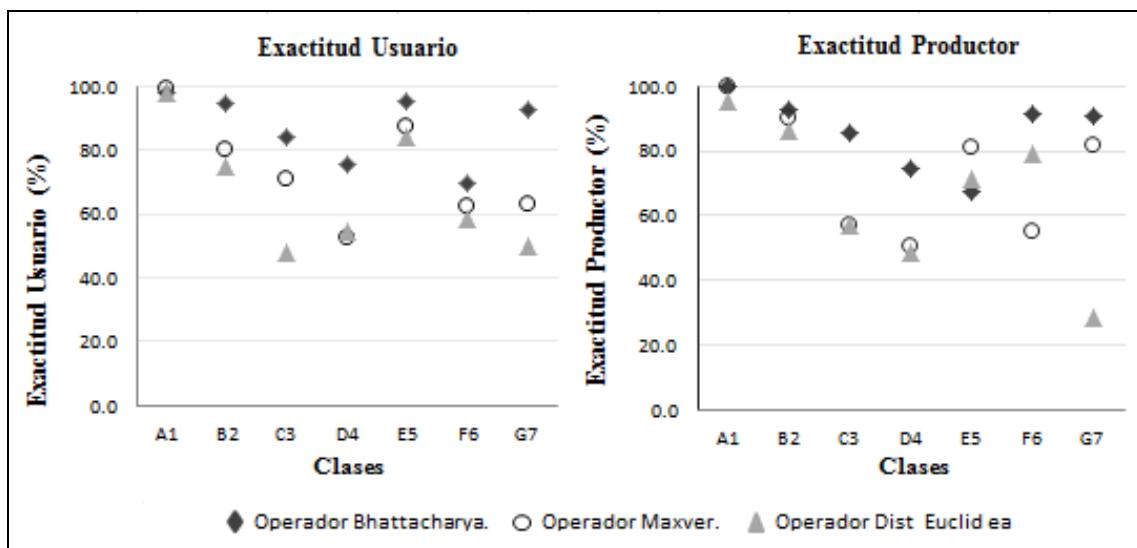


Figura 30. Precisión del usuario y Productor del mapa.

Los algoritmos de clasificación Bhattacharya, Máxima verosimilitud y Distancia Euclídea, presentaron área sin clasificar con valores de 32,09%, 35,68% y 29,75 respectivamente. De acuerdo con Olaya (2014), es una característica común del clasificador Bhattacharya, en el que existen elementos que no pueden ser clasificados al no caer dentro de ningún paralelepípedo (Figura. 31). Del mismo modo, pueden solaparse así como ciertos elementos también pueden pertenecer simultáneamente a varias clases. Sin embargo, el algoritmo de Bhattacharya con la técnica de crecimiento por regiones presentó mayor exactitud respecto a los otros algoritmos de clasificación comúnmente utilizados. Por otra parte, el clasificador Bhattacharya mostró una imagen con poco ruido (Figura 31.a), es decir, con pocos pixeles aislados, puesto que emplea las regiones de la segmentación como contorno en la discriminación de clases. Por otra parte, el clasificador Maxver (Figura 31.b) mostró deficiencia en la clasificación al confundir suelos forestales (C3) con zonas agrícolas (D4), situación causada a la poca densidad de la plantación forestal. De igual forma confundió suelos posiblemente húmedos con zonas de bosque con gramíneas inundables (G7). Mientras que el clasificador de mínima distancia presentó problemas al intentar discriminar esta misma clase.

Otras confusiones se generaron con el algoritmo de clasificación de Mínima Distancia (Figura 31.c), este operador confundió gran parte de la clase de bosque bajo y sabana de gramínea inundable (G7), con la clase de bosque y matorral (F6). Esto se atribuye a ciertos factores presentes en la clase G7 por ejemplo: la poca profundidad y contenido de agua en el suelo, estado o tamaño de la gramínea, su densidad, etc., lo cual hace suponer su confusión con la clase F6, ocasionando una subestimación de la clase G7 en cuanto al área clasificada y una sobreestimación del área por parte de la otra clase F6.

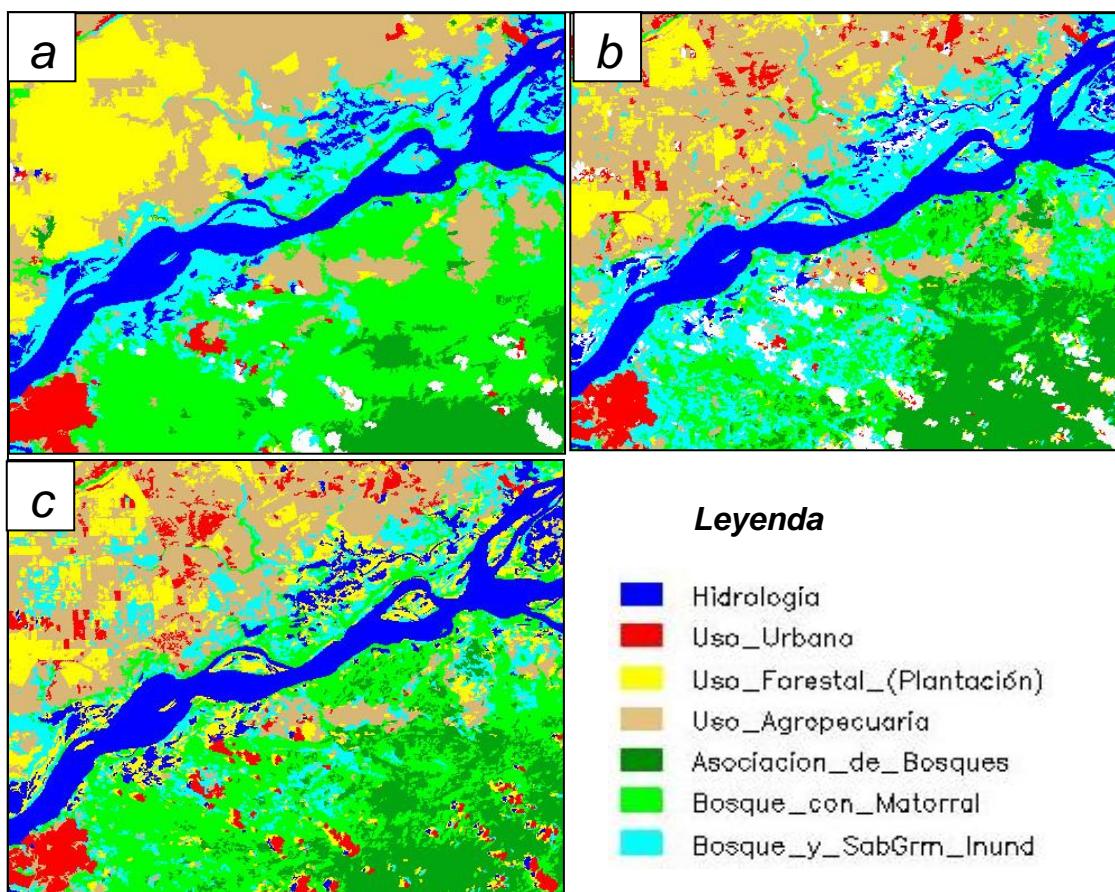


Figura 31. Clasificación por los algoritmos de: a. Bhattacharya, b. Maxver (máxima verosimilitud) y c. Distancia Euclídea (mínima distancia).

7.3 Integración de los datos en un SIG Local

7.3.1 Productos cartográficos: mapa regional del área de trabajo

En este caso, se trata de convertir la imagen de satélite clasificada en un mapa temático, el cual va acompañado de la información vectorial que se disponga

como vías de comunicación, red de drenaje, curvas de nivel, etc. Dicha información vectorial se superpuso a la imagen clasificada como líneas de referencia. Posteriormente, al mapa se le añadieron algunos elementos de interés como son: una leyenda en color, una escala gráfica y algunos rótulos identificativos de la zona de trabajo (Figura 32).

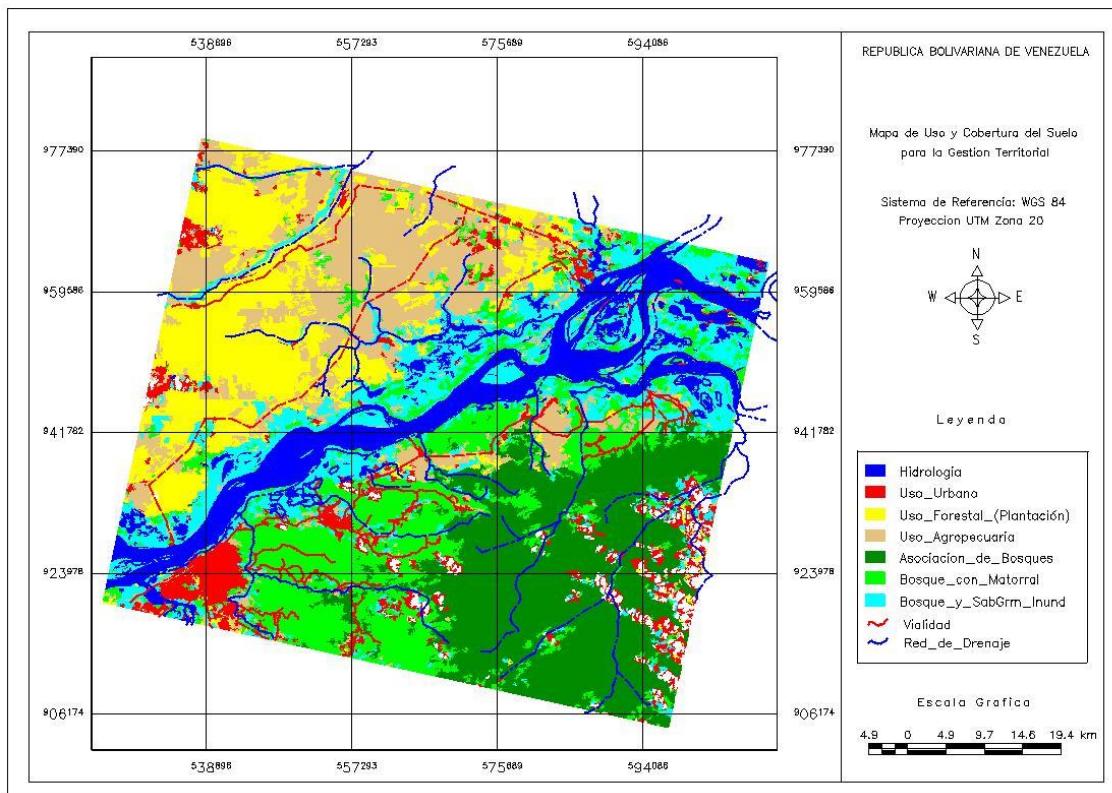


Figura 32. Producción Cartográfica: Mapa temático (elaboración propia).

7.3.2 Productos estadísticos

En este otro caso el tratamiento digital de imágenes además de determinar la matriz de confusión empleando parámetros estadísticos permitió calcular superficies sobre toda la imagen o sobre un determinado polígono perteneciente a unas determinadas clases. Se trata de obtener un inventario del área de las clases que participaron en el proceso de clasificación, esto representa el número de pixeles incluido en cada una de las categorías. Ya que se conoce la dimensión superficial de cada pixel, resulta favorable determinar la extensión ocupada por cada categoría previamente establecida. La Tabla 9, muestra un reporte con la gráfica correspondiente al área en hectáreas

ocupadas para cada una de las clases involucradas en la clasificación. Ésta refleja el análisis de la superficie clasificada para cada una de las clases, donde las clases de bosque y matorral (F6), presentaron una cobertura dominante del 15,41% y del 16,16% de la superficie total con el algoritmo Bhattacharya y Distancia mínima respectivamente, mientras que por otra parte presentó unos valores iguales a 8,83% con el clasificador de Máxima verosimilitud. La cobertura dominante se vio influenciada por la clase asociación de bosques (E5), al intentar clasificar el matorral y bosque bajo como asociación de bosque, situación que se prevé que ocurra en la intersección de ambas clases. Otro aspecto importante a tener en cuenta fue la clase bosque con sabana inundable (G7), que se sobreestimo en un 13,34% con el algoritmo de máxima verosimilitud. Macedo-Cruz, et al. (2010) presentan igualmente dificultades al intentar clasificar cuerpos de agua pocos profundos con pastos, situación que también se ve afectada por la estación del año en que se toma la escena. En la gráfica de la Tabla 9 y Figura 33, se puede observar el comportamiento que presentó cada una de las clases involucradas para los tres procesos de clasificación.

Tabla 9. Clasificación de áreas (ha), realizado por los distintos algoritmos de clasificación.

Clases	Superficie (ha)					
	Bhattacharya	%	Maxver	%	Dist. Euclid	%
A1. Hidrología	48421,52	7,74	46690,00	7,46	53932,12	8,62
B2. Uso Urbano	11301,16	1,81	20016,88	3,20	34729,20	5,55
C3. Uso Forestal	57228,20	9,14	34460,72	5,51	63841,20	10,20
D4. Uso Agrícola	91078,16	14,55	93879,32	15,00	85657,32	13,69
E5. Asociación de Bosque	58484,40	9,34	68756,20	10,99	56910,32	9,09
F6. Bosque y Matorral	96428,20	15,41	55242,76	8,83	101130,92	16,16
G7. Bosque Inundable	62073,24	9,92	83501,32	13,34	43457,20	6,94
Registro de la clasificación						
Total área Clasificada	425014,9	67,91	402547,2	64,32	439658,3	70,25
Total área no Clasificada	200841,8	32,09	223309,4	35,68	186198,4	29,75
Total área del Plano de Información	625856,6	100	625856,6	100	625856,6	100

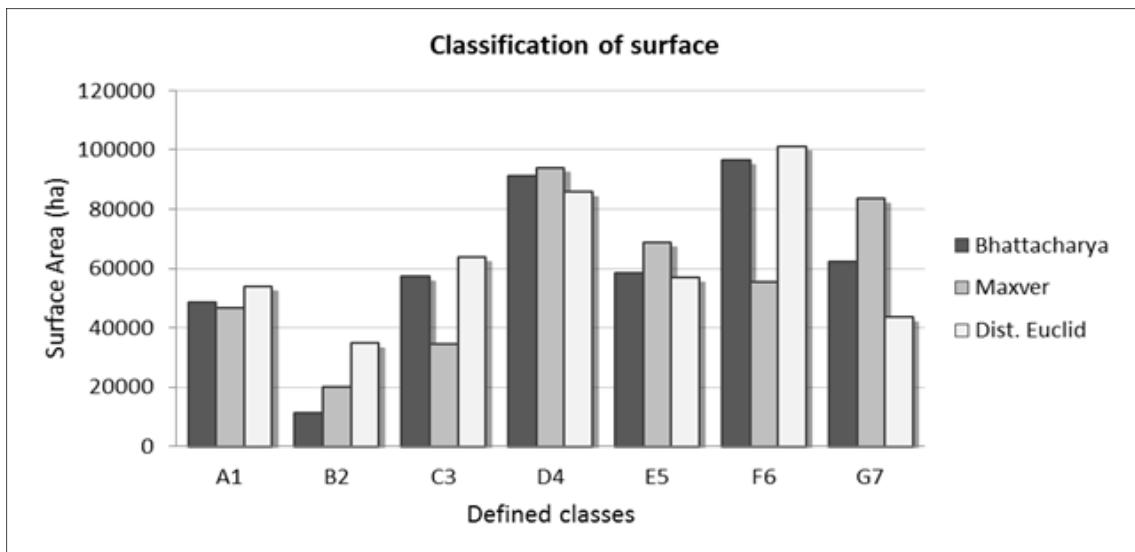


Figura 33. Superficies Clasificadas por los algoritmos Bhattacharya, Maxver y Dist. Euclidea.

7.3.3 Otros tipos de Productos: Web Mapping

Otro tipo de productos que actualmente se están generando en el mundo amplio de los SIG son las aplicaciones dinámicas en Web, aunque algunas requieren interacción compleja con bases de datos. Sin embargo y aunque no es el objetivo de este trabajo, también es posible generar a partir de un SIG local una aplicación sencilla que no requiera de una interacción compleja con bases de datos. Sino que con el código HTML, Java Script y algunas herramientas open source existentes como editores de texto como Notepad++, y mediante la API de funcionalidad Open Layers o Leaflet, se pueda generar a futuro un Web mapping, es decir, hacer pública nuestra información cartográfica a través de un SIG desarrollado para el web.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente Tesis Doctoral se utilizó la clasificación digital de imágenes para analizar los diferentes tipos de cobertura y uso de suelo. Las clasificaciones se realizaron por medio de tres algoritmos de clasificación supervisada a partir de herramientas open source, se emplearon imágenes de satélites CBERS-2 de libre acceso con 20 metros resolución espacial. Se identificaron 7 clases de cobertura de suelo y se evaluaron la superficie correspondiente a cada una de ellas. Se generaron tres mapas temáticos y se compararon entre sí los resultados obtenidos con cada uno de los procesos de clasificación. Asimismo, se evaluó la eficiencia de las herramientas open source de GvSIG, QGIS y Spring mediante el índice de fiabilidad global e índice kappa obtenido a partir de la matriz de error.

Los resultados obtenidos por los diferentes algoritmos de clasificación a partir de herramientas open source, mostraron sin duda su fiabilidad desde el punto de vista funcional. Estudios de uso de la tierra, llevados a cabo con software comercial privativo, utilizando imágenes de satélite incluidas también las de libre acceso, han alcanzado coeficientes globales de índice Kappa de entre 0,64 y 0,89 (Kiptala. et. al, 2013). El índice kappa logrado para este estudio fue 0,81%, siendo una clasificación robusta tal y como establece Dos Santos, et al., (2010). El algoritmo Bhattacharya presentó mejor comportamiento respecto al de Máxima verosimilitud y Distancia Euclídea, puesto que trabaja con las regiones de la imagen segmentada y no a nivel de pixel como en los otros casos. Por ejemplo algunos autores como Tingting y Chuang (2010) lograron un Kappa de 0,80 en la cuenca del río Chao Phraya en Tailandia, Redo y Millington (2011) alcanzaron un Kappa de 0,87 en su estudio en zonas tropicales y Vorovencii y Muntean, (2013) obtuvieron un kappa de 0,86, en la evaluación de algoritmos de clasificación.

Este estudio refleja como las funcionalidades que ofrecen las herramientas de software libre están avanzando día tras día en su perfeccionamiento, gracias a la constante y multitudinal comunidad de usuarios interconectados de todas

partes del mundo. Estas pueden asistir a aquellas zonas en desarrollo o de pocos recursos en cuanto a la producción cartográfica y actualizaciones, garantizando además la interoperabilidad entre diferentes sistemas de software. La adquisición de licencias de software SIG es un aspecto importante a tener presente en todo proyecto, consumiendo en algunos casos gran parte del presupuesto del mismo.

Por otra parte, es importante destacar que el análisis de la información procedente de sensores remotos es rápido, de coste relativamente nulo y de alta fiabilidad, convirtiendo a estas herramientas en una alternativa real para estudiar zonas con pocos recursos (Navarro, et al 2008). Asimismo, constituyen una alternativa económicamente viable para países en desarrollo, ya que algunas empresas, instituciones del estado e investigadores utilizan herramientas basadas en soluciones comerciales en el desarrollo de sus proyectos como es el caso de López (2009); Pretel, et al (2010); Londoño (2012) entre otros. Estas soluciones generan elevados costes en derechos de adquisición de licencias de software.

En base a los resultados obtenidos, la metodología propuesta pone de manifiesto que es posible generar a bajo coste información lo suficientemente confiable y precisa para el desarrollo de un SIG actualizando además la información de los recursos existentes. De esta manera, se facilita la actuación por parte de los actores involucrados al proceso de toma de decisiones que garanticen un equilibrio ecológico acorde con los planes de gestión del territorio.

Partiendo del proceso digital de las imágenes de satélites CBERS-2, la clasificación de bosques tropicales presenta una limitante importante en cuanto la variable estructural “altura”, la cual no se consideró en el estudio para las clases resultantes. Sin embargo, el algoritmo Bhattacharya presentó mayor fiabilidad global e índice Kappa empleando las regiones de la imagen como contorno de áreas de entrenamiento, lo que indica de acuerdo con Payacan y Formaggio, (2005); Conde (2009); Bhosle y Pawar, (2013) que la clasificación por regiones produce índices que corresponden mejor con la realidad. Sería conveniente en futuros proyectos evaluar esta limitante, acompañada del

sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge, y estudiar la viabilidad de considerar esta variable con los nuevos productos de datos LiDAR mediante software libre, debido a que proporcionan información de los diferentes estratos de suelo permitiendo determinar la altura de varios elementos del terreno, a través del cálculo de los modelos digitales de terreno y superficie.

Las alternativas tecnológicas desarrolladas con estándares abiertos y la información espacial geolocalizada juegan un papel muy importante, han sido el punto de arranque de muchos países desarrollados. En este sentido, países en vías de desarrollo como la República Bolivariana de Venezuela, a través de los organismos públicos competentes deben implementar políticas para hacer disponible la información geográfica necesaria a fin de descentralizar la misma a niveles estatales e incluso locales. Esta situación permitiría de forma gratuita el libre acceso a la información, con lo cual investigadores, universidades y empresas pueden disponer de ella para la generación y transferencia de conocimiento en beneficio de la sociedad, favoreciendo el desarrollo e impulsando nuevos modelos de cambio que garanticen la interoperabilidad.

Por otra parte, los SIG como instrumento de apoyo estratégico al Plan de Ordenamiento Territorial (POT), conocido también en otros países como Plan de Ordenamiento Ecológico Territorial, deben generar productos básicos, con relación a los subsistemas principales que forman parte del entorno como lo son el administrativo, biofísico, social, económico y funcional.

El levantamiento del conjunto de datos y la extracción de información temática son una parte más importante en la etapa de diagnóstico territorial, en la cual se genera gran volumen de datos en diferentes formatos gráficos, de estudios, informes, reportes, estadísticos, indicadores, entre otros. Con base a estas fuentes es que depende la calidad de un POT, ya que por medio la retroalimentación se perfecciona el diseño del SIG y se define la información temática que se desea producir, de modo que, una vez procesados los datos se estructuran las bases de datos, para producir diferentes clases de mapas y realizar diversos análisis en función de las necesidades planteadas.

En este contexto, y siguiendo el mismo orden de ideas sería conveniente antes de la realización de un POT, evaluar y hacer un diagnóstico de la situación actual de la Información Geográfica en la República Bolivariana de Venezuela, con lo cual se recomienda organizar toda la información cartográfica existente en el país, instituciones que la producen y/o actualizan a fin de establecer acuerdos en cuanto al marco legal que las regula. Con el apoyo del Instituto Cartográfico de Venezuela Simón Bolívar, se deberá organizar la cartografía digital y analógica del estado, estructurar los registros cartográficos, elaborar catálogos de datos espaciales, actualizar y/o digitalizar la mapoteca o cartoteca, homogenizar normas en cuanto a la producción de cartografía básica (es decir, definir las escalas de producción) y temática en cuanto a mapas de riesgos, pendientes, unidades de paisajes, cobertura y uso de suelo, redes de transporte, zonificación ecológica entre otros. Asimismo considerar programas de teledetección a fin de garantizar calidad en los productos derivados del proceso como los modelos digitales de terreno (MDT) y elevaciones (MDE), así como los de la fuente de datos como ortoimágenes y/o ortofotos.

Por todo lo anteriormente expuesto, conviene destacar la elaboración de un adecuado Plan Cartográfico para Venezuela, donde toda la información se integre en un sistema cartográfico Nacional, que mediante una infraestructura de datos, cobre sentido todo el esfuerzo institucional y se garantice el acceso a la información, tal y como lo demuestran algunas comunidades autónomas de España (ICA, 2008 y IGA, 2017).

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS Y DIGITALES



9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACHILLE, C; ADAMI, A; CHIARINI, S; CREMONESI, S; FASSI, F; FREGONESE, L AND TAFFURELLI L (2013). UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua Italy.
- ALTOBELLINI, A; SGAMBATI, A; BADER, F; FIOR, G; MAGAJNA, B; FERRAZZO, L; BRAUT, R; URRUTIA, P; GANIS, P; ORLANDO, S. (2010). "Application of gvSIG in a study related to forest fire monitoring". Dipartimento di Scienze della Terra – Stazione Meteorologica di Trieste. Università degli Studi di Trieste for meteorological data. [Formato PDF].
- ANGUIX, A. (2005). gvSIG. "Soluciones de Código Abierto Para Las Tecnologías Espaciales". Revista Geo-Focus.org. 2005. [Formato Doc. de Word].
- ARIZA LÓPEZ, F. Y RODRÍGUEZ PASCUAL, A. (2008). Introducción a la Normalización en Información Geográfica: la familia ISO 19100. (230 pp.). Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica. Universidad de Jaén. Disponible: <http://coello.ujaen.es/Asignaturas/pcartografica/recursos.htm>
- AROCHE, S. (2007). "Historia del Correo electrónico, el correo electrónico también conocido como e-mail, es un recurso tecnológico que nos permite comunicarnos desde cualquier parte del mundo a través de Internet", Disponible: <http://www.maestrosdelweb.com/editorial/emailhis/>.
- ARRIOLA, O, TECUATL, G Y GONZÁLEZ, G. (2011). Software propietario vs software libre: una evaluación de sistemas integrales para la automatización de bibliotecas. Investigación Bibliotecológica, Vol. 25, Núm. 54, México, ISSN: 0187-358X. pp. 37-70.
- BARAHONA, J; PASCUAL, J; ROBLES, G. (2005). Introducción al software Libre. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya (UOC). Primera Edición. Noviembre, 2003 [Formato PDF].
- BASCH, R. (2000). Internet: Origen Y Posible Futuro. PC World, Centroamérica. IDG Comunications. Edición Octubre, México.
- BATES, C (2016). El Misterio del Origen del Símbolo @. BBC, Mundo. Disponible: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/03/160308_misterio_signo_arroba_finde_dv
- BAUMANN, P. (ed.). (2010). OGC WCS 2.0 Interface Standard – Core. Versión 2.0.0, OGC 09-110r3. (53pp.). [Consulta: 25/02/2017]. Disponible: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=41437.

- BERNABÉ-POVEDA, M Y LÓPEZ-VÁZQUEZ, C. (2012). Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE). Universidad Politecnica de Madrid (UPM). ISBN 978-84-939196-6-5.
- BHOSLE. V AND PAWAR. V, (2013). Texture Segmentation: Different Methods. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN: 2231-2307, Volume-3, Issue-5. [consultation: 2014, October].
- BLAKE, S; LOCHTER, F; DOYLE, A. (2001). Visualización de datos geoespaciales. Cartografía en la red. Recetario para Infraestructuras de Datos Espaciales IDE. Revisión 8 Mayo 2001. Disponible. <http://redgeomatica.rediris.es/metadatos/publica/recetario/html/capitulo05.htm>.
- BOGNANNI, F., (2010). Aplicación de la teledetección en un estudio del pasado a una escala inter-regional. El caso de los “corrales de indios”, GeoFocus, nº 10, p.27-46. ISSN: 1578-5157.
- BONET. F, PÉREZ-PÉREZ. R, BENITO. B, SUZART DE ALBUQUERQUE. F, ZAMORA. R. (2014). Documenting, Storing, And Executing Models In Ecology: A Conceptual Framework And Real Implementation In A Global Change Monitoring Program. Environmental Modelling & Software 192e199
- BOSQUE, S ; CEBRIAN, M; JIMENEZ, B; et al. (1988). Aplicaciones de la informática a la Geografía y Ciencias Sociales. Madrid: Síntesis, 319 pp. Disponible: <http://www.ub.es/geocrit/b3w-503.htm>. [Consulta: 2007 Enero].
- BRICEÑO, M. (2005). Consideraciones Teórico – Metodológicas Sobre la Ordenación del Territorio. Revista Forestal Latinoamericana. Nº 38, pp. 21 –37. [Consulta: 2010, Diciembre]. [Formato PDF].
- BUCKLEY, E., GAHEGAN, M. & CLARKE, K. C. (2000): Geographic visualization as an emerging research theme in GIScience. Santa Barbara, CA.
- BUDHATHOKI, N., BRUCE, B. y NEDOVIC-BUDIC, N. (2008): Reconceptualizing the role of the user of spatial data infrastructures. GeoJournal, 72, pp. 149 - 60.
- BUENO DE LA FUENTE, G. (2008). Análisis de la Interoperabilidad entre los Sistemas de Apoyo a la Formación de Tecminho. Universidad Carlos III de Madrid
- CAMARA, G; MODESTO, R; FREITAS, U; GARRIDO, J; MITSUO, F. (1996). SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented Data Modelling. Image Processing Division (DPI). National Institute for Space Research (INPE), Brazil. 20: (3) 395 - 403. Disponible: <http://www.dpi.inpe.br/spring/espanol/index.html>.

- CARMONA, A; MONSALVE, J. (2008) Monografías Punto Com. Sistemas de Información Geográfica. Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos/gis/gis.shtml>. [Consulta: 2008, Mayo].
- CASTELLANOS-BARRERO (2010). Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en el Territorial. Ventana Informática, Nº 22 – Universidad de Manizales, Colombia. Pp 39-53. ISSN: 0123-9678
- CASTILLO E., BELMONTE F. Y ANDRADE, E., (2012). Uso de herramientas SIG en la identificación y valoración de cambios en Cauces de ramblas costeras. Murcia, España. Papeles de Geografía, núm. 55-56, 2012, pp. 25-36 Universidad de Murcia, España.
- CASTRO, L. (2011). El Dr. Eliseo Cantellano de Rosas y la Geomática: instantáneas satelitales de nuestro planeta [Versión electrónica], Ciencia Compartida, 3, 37-41. [Consulta: 22/01/2017].
- CERVERA, J. (2005). “El Nacimiento de una Idea”. Breve Historia de Internet. 20 Minutos. Marzo, 2005. Disponible: <http://www.20minutos.es/noticia/6528/0/breve/historia/internet/>. [Consulta: 2007, Octubre].
- CHAN, T., M.-E. FEENEY, A. RAJABIFARD AND I. WILLIAMSON (2001), *The dynamic nature of spatial data infrastructures: A method of descriptive classification*, Publisher: Canadian Institute of Geomatics. Disponible: [http://www.csdlila.unimelb.edu.au/publication/journals/DynamicNature_of_SDI_Methodof_Descriptive_classification.pdf]: [Consultado: 30/5/2017].
- CHEEMA, M, BASTIAANSSEN. M. W.G.M., (2010). Land use and land cover classification in the irrigated Indus Basin using growth phenology information from satellite data to support water management analysis. Agricultural Water Management 97, 1541–1552.
- CHUVIECO, E (2007a). Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia. 3ra Edición. Pp. 421 – 424.
- CHUVIECO, E; MARTIN, M; VENTURA, G. (2007b). Evaluación De Imágenes Noaa-Avhrr Y Terra-Modis Para Cartografía Regional De Áreas Quemadas. [Formato PDF].
- CITA (Centro de Investigación y tecnología Agroalimentaria de Aragón), (2013). La teledetección como herramienta de apoyo a la gestión en agricultura. Ciclo de Divulgación de la Teledetección. Parque Tecnológico Walqa - Planetario, Huesca, España.
- CLARK, J. (1980). Computadoras En Acción. 1ª. Edición, España. Editorial Bruguera

- CLEMENTE, M; NAVARRO, R; KASIMIS, N; HERNÁNDEZ, E; PADRÓN, E; MARTÍN-CONSUEGRA, E; HERNÁNDEZ, R; GARCÍA-FERRER, A. (2006). Evaluation of the Harvest of Prunus africana Bark on Bioko (Equatorial Guinea): Guidelines for a Management Plan. 2006. Pp. 178. [Formato PDF].
- CLINTON. W (1994). Executive order 12906: Coordinating geographic data acquisition and access: The national spatial data infrastructure. *Federal Register*, 59:17671 – 17674, Disponible: http://www.fgdc.gov/policyandplanning/executive_order
- COMÍN, J. (2003). “Historia de Microsoft. Todo el mundo relacionado con la informática conoce de esta empresa. Algunas la idolatran y otros le odian”, 2003. Disponible: <http://www.maestrosdelweb.com/editorial/microsoft/>. [Consulta: 2007, Agosto].
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), (2012). Sistemas de Información Geográfica “Software Libre”. 110 pp, México.
- CONDE, M; PERELMAN, S; CEREZO, A. (2009). Efecto de diferentes métodos de clasificación de imágenes satelitales sobre índices de paisaje. *Revista de Teledetección*. 2009. 32: 5-13. [Consulta: 2011, Enero]. [Formato PDF].
- CONESA, C., (1996). Áreas de aplicación medioambiental de los SIG Modelización y avances recientes. *Papeles de geografía*, .N. 23-24, 1996. Pág. 101-1 15, España.
- CONGALTON, R., GREEN, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, second ed. CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA [Consultation: 2016, November].
- CRAGLIA. M. (2009). Inspire: The european spatial data infrastructure. In INSPIRE Conference.
- CSG (Consejo Superior Geográfico). Infraestructura de Datos Espaciales de España, IDEE. Disponible: <http://www.idee.es/web/guest/el-proyecto>. [Consultado: 5/2/2017].
- CULEBRO, M; GÓMEZ, W; Y TORRES, S. (2006). Software libre vs software propietario Ventajas y desventajas. Mexico.
- DÁVILA. F, and CAMACHO. E, (2012). Georreferenciación de documentos cartográficos para la gestión de Archivos y Cartotecas. “Propuesta Metodológica”. Instituto Geográfico Nacional. [Consulta: 2014, Septiembre]. [Formato PDF].
- DE LA BEAUJARDIERE, J. (ed.). (2006). Open Geospatial Consortium. Web Map Service Implementation Specification, version 1.3.0., (84 pp.). [Consulta. 23/02/2017]. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/standards/wms>

- DEL TORO, N; GOMARIZ-CASTILLO, F; CÁNOVAS-GARCÍA, F Y ALONSO-SARRÍA; F. (2015). Comparación de Métodos de Clasificación de Imágenes de Satélite en la Cuenca del Río Argos (Región De Murcia).
- DELGADO, T; CROMPVOETS, J. (2007). Infraestructuras de Datos Espaciales en Iberoamérica y El Caribe. Habana, Cuba 2007. IDICT. 213 p. [Consulta: 2011, Noviembre]. [Formato PDF].
- DI SOMMA, A., FERRARI, V. Y RAMOS, N., (2010). Actas do XII Colóquio Iberico de Geografia. Porto: Faculdade de Letras. Universidade do porto. ISBN 978-972-99436-5-2 (APG); 978-972-8932-92-3 (UP-FL).
- DOMINGOS DA SILVA, D; ESCARTÍN SAULED, E & JIMÉNEZ SÁEZ, G. (2014). Modelo digital de elevaciones de una zona urbana para la simulación hidrológica. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 35(2), 123-137. Disponible: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382014000200009&lng=es&tlang=es ISSN 1680-0338.
- DOS SANTOS, A; OLIVEIRA, T; SUEMI, N. (2010). Aplicaciones Prácticas con Spring. Biblioteca sectorial de ciências agrarias, Universidad Federal do Espírito Santo, ES, Brasil. [Formato PDF].
- ECHEVERRÍA M. (2001). Las infraestructuras de datos espaciales. Experiencias en su implantación. Boletín. Disponible: <http://redgeomatica.rediris.es/metadatos/publica/articulo15.pdf>.
- ECHEVERRIA, M. (2001). Las Infraestructuras de Datos Espaciales. Experiencias en su Implantacion. 200. pp. 38-50. [Formato PDF].
- ESRI. (2002). Gis and cad-the right tool for the job. an esri white paper. Technical report, ESRI, Disponible: <http://www.systematics.co.il/gis>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). [Consulta: 2013]. Disponible: <http://www.fao.org/Noticias/1997/971201-s.htm>.
- FEIXA, C; FERNÁNDEZ-PLANELLS, A; FIGUERAS-MAZ, M. (2016). Generación Hashtag. Los movimientos juveniles en la era de la web social Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud, vol. 14, núm. 1, pp. 107-120.
- FERGUSON, P. (1996). Conéctate al Mundo de Internet, para windows95, Ed Krol., México, pág. 6
- FGDC (Federal Geographic Data Committee), (2011). Geospatial Metadata. Disponible: <https://www.fgdc.gov/metadata>.

- FGDC (Federal Geographic Data Committee). (1993). National Geodata Policy Forum, editor. Present and emerging U.S. policies governing the development, evolution, and use of the National Spatial Data Infrastructure. U.S. Geological Survey
- FUNDACIÓN POLAR (1997): Diccionario de Historia de Venezuela, tomo 1 [en línea]. Biblioteca Virtual Cervantes. [Citado 11 de abril 2006]. Cartografía. Introducción. Disponible en: <http://www.cervantesvirtual.com/portal/venezuela/cartografia.shtml>.
- GACETA OFICIAL N° 37.378. REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (2002): “Decreto N° 1.666”. Inicio del proceso de Regularización de la Tenencia de la Tierra en los Asentamientos Urbanos Populares. 4 de febrero de 2002, pp. 1-4.
- GACETA OFICIAL N° 38.095. REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (2004): Decreto N° 3.390. Uso del Software Libre Desarrollado bajo Estándares Abiertos.
- GACETA OFICIAL N° 38.648. REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (2007): Decreto N° 5.263. “Infocentro”. Ministerio de Ciencia y Tecnología [en línea]. [Consulta: 2008, Febrero]. Disponible en: <http://www.infocentro.gob.ve/index.php/conocenos?layout=edit&id=111>
- GACETA OFICIAL N° 39.335. REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (2009). Ley Orgánica de los Consejos Comunales. 28 de Diciembre. Disponible: <http://www.asambleanacional.gob.ve/>
- GACETA OFICIAL N° 5.453. REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (2000): “Constitución de la República Bolivariana de Venezuela”. Extraordinario. Caracas, Venezuela, Imprenta Nacional. [Consulta: 2011, Octubre]. Disponible en: <http://www.tsj.gov.ve/legislación/constitucion1999.htm>.
- GACETA OFICIAL N° 5.820. REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (2006). Decreto N° 2945 del 14-10-98. Ley de Reforma Parcial de la Ley Orgánica para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio.
- GARCÍA, M Y PÉREZ, M. (2014). Análisis multitemporal del urbanismo expansivo en el corredor del Henares. Aportación de las imágenes de satélite. Estudios Geográficos. Vol. LXXV, 277, pp. 597-618. ISSN: 0014-1496. SSN: 1988-8546. doi: 10.3989/estgeogr.201419.
- GARTZIA. M, (2013). Vegetation Classifications in Mountainous Areas. Mountain Research and Development (MRD). An international, peer-reviewed open access journal published by the International Mountain Society (IMS). Vol 33 No 1: 63–74. [consultation: 2014, October].

- GDAL (2011). Listado de formatos vectoriales y de imágenes existentes. [Consulta: 21/12/2016]. Disponible: http://www.gdal.org/formats_list.html y en <http://www.gdal.org>.
- GDAL (2017). Listado de formatos vectoriales y de imágenes existentes. [Consulta 05/03/2017]. Disponible: http://www.gdal.org/formats_list.html.
- GDAL (Geospatial Data Abstraction Library). (2015). Disponible: <http://live.osgeo.org/es/index.html>. [Consulta: 2015, Diciembre].
- GHILANI, C; WOLF, P., (2012). Elementary surveying an introduction to geomatics. Pearson Education 2012
- GIS WORLD (1996). Roger Tomlinson: the father of GIS. (GIS World Interview). GIS World. 9(4):56-59.
- GOBERNACIÓN DEL ESTADO DELTA AMACURO. [Consulta: 2009, Octubre]. Disponible: http://www.gobiernoenlinea.ve/venezuela/perfil_delta_amacuro.html
- GOBERNACIÓN DEL ESTADO MONAGAS. [Consulta: 2009, Noviembre]. Disponible: http://www.monagas.gob.ve/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=60
- GOMARASCA, M. (2010). Basics of geomatics. Appl Geomat 2:137–146. Disponible: DOI 10.1007/s12518-010-0029-6
- GONZÁLEZ, V; PEÑARRUBIA, F; HIGÓN, J; SANZ, J; ANGUIX, A. (2010). Infraestructura de Datos Espaciales de Venezuela, una IDE 100% software libre. Sigte. Girona. [Formato PDF].
- GOODCHILD, M. F. (2007): Citizens as sensors: the world of volunteered geography. GeoJournal, 69(4), pp. 211 - 221.
- GSDI (Infraestructura Global de Datos Espaciales). Boletín Informativo para Latinoamerica y el Caribe. (2009). Vol: 6, Nº 12, pp. 5. [Formato PDF].
- GUERRA, N (2013). Licencias Incompatibles de software libre. Revista Chilena de Derecho y Tecnología. Universidad de Chile. ISSN 0719-2576. VOL. 2 NÚM. 1 (2013). PÁGS. 169-195. DOI 10.5354/0719-2584.2013.22402
- GUILLÉN, M; HERNÁNDEZ, M; MEROÑO DE LARRIVA, J; CRUZ, J, AGUILERA, M. (2006). Primera Aproximación a la Utilización de las Imágenes de Satélite Aster para la Determinación Automática de la Leyenda Corine Land Cover. XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. El Acceso a la Información Espacial y las Nuevas Tecnologías Geográficas. Granada, 2006. [Consulta: 2010, Diciembre]. Disponible en: <http://age.ieg.csic.es/metodos/congresos/granada06.html>

- GUISADO. Á. (2004). La Formación y Perfección del Contrato en Internet, Marcial Pons, Madrid. Pág.59.
- GUTIÉRREZ, G. (2004). Desarrollo e Implementación de Cartografía Interactiva en Sitios Web: Caso de Digital Geosciences en México. [Formato PDF].
- GUTIÉRREZ. J y URREGO. G (2011). Los sistemas de información geográfica y los planes de ordenamiento territorial en Colombia. Perspectiva Geográfica. ISSN: 0123-3769. Vol. 16. Pp 247-266.
- GvSIG. Sistema de Información Geográfica de la Generalidad Valenciana. Manual de Usuario. Consejería de Infraestructuras y Transporte. España, (2011). Disponible en: <https://gvsig.org/web/projects/gvsig-desktop/official/gvsig-1.11/descargas>
- HARROWER, M. (2004). A look at the History and future of animated maps. *Cartographica*, V. 39, Num. 3, 33-42 pp.
- HEALY, K AND SCHUSSMAN, A (2003). The ecology of open source software development. [Formato Pdf].
- HERRERA, B. (2001). Geomática, Principios y Aplicaciones. Chapingo. México. [Consulta: 02/01/2017]. Disponible: <http://es.calameo.com/read/0009570072151eef4ee1e>
- HEYWOOD, I (1998). An introduction to Geographical Information Systems. Longman.
- ICA (Instituto de Cartografía de Andalucía), (2008). Plan Cartográfico de Andalucía, 2009-2012. Consejería de Vivienda y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía, España.
- ICAZA,P. (2012). Aplicaciones Geomáticas para la Toma de Decisiones. Realidad, Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía.
- IDEVEN. (Infraestructura de Datos Espaciales de Venezuela). [Consulta: 2013, Julio]. Disponible: http://www.geoportalsb.gob.ve/geoportal_sitio/
- IGA (Instituto Geográfico de Aragón), (2017). Plan Cartográfico de Aragón, 2017-2020. Gobierno de Aragón. Departamento de Vertebración del Territorio, Movilidad y Vivienda. Aragón, España.
- IGVSB (INSTITUTO GEOGRAFICO DE VENEZUELA SIMON BOLIVAR). [Consulta: 2008, Junio]. Disponible en: <http://igvsb.geoportalsb.gob.ve/>.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). XIV Censo Nacional de Población y Vivienda. Estado Delta Amacuro. Diciembre, (2014a). Disponible: http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95&Itemid=9.

- INE (Instituto Nacional de Estadística). XIV Censo Nacional de Población y Vivienda. Estado Monagas. Diciembre, (2014b). Disponible: http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95&Itemid=9
- INPE. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). CBERS, Satélite Sino - Brasileiro de Recursos Terrestres. Ministerio de Ciencia y Tecnología. [Consulta: 2012, Enero]. Disponible en: <http://www.cbers.inpe.br/>
- INSPIRE (2007). Establishing an infrastructure for spatial information in the european community (inspire). Technical report, European Parliament, [Consulta: 6/03/2017]. Disponible: http://www.ec-gis.org/inspire/directive/I_10820070425_en00010014.pdf. o <http://www.idee.es/web/guest/europeo-inspire>.
- IPGH (Instituto panamericano de Geografía e Historia), Comité ISO/TC 211. (v2 2013) Guía de normas. Información Geográfica/Gemática. [Consulta: 26/02/2017]. Disponible: <http://www.isotc211.org/Outreach> o <http://www.ipgh.org/>
- IPGH. (INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA). (2010). Guía de Normas. Comité ISO/TC 211 Información Geográfica / Geomática. [Consulta: 2012, Febrero]. [Formato PDF].
- ISO 19115:2003. (2003). Geographic information - spatial referencing by geographic identifiers. Disponible: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=26017.
- ISO 19123:2005. (2005). Geographic information - Schema for coverage geometry and functions. [Consulta 25/02/2017]. Disponible: <https://www.iso.org/standard/40121.html>.
- ISO 19142:2010. (2010). Geographic information - Web Feature Service. [Consulta 25/02/2017]. Disponible: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=42136
- ISO/TC 211 (2009). Standards Guide. Geographic Information/Geomatics. ISO/TS 19139:2007 Geographic Information — Metadata — Xml Schema Implementation. Disponible: <https://www.iso.org/standard/32557.html>
- JENSEN, J. (1996). Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. 2nd. Ed., Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Upper Saddle River, New Jersey.
- KAHN, B; CERF, V. (2007). "Wikipedia, the Free Encyclopedia" Artículo TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol). Disponible: http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_E._Kahn. [Consulta: 2007, Abril].
- KELLY, R; JAKERMAN, A; BARRETEAU, O; BORSUK, M; ELSAWAH, S; RIZZOLI, A; and Voinov, A, (2013). Selecting among five common modelling approaches for

- integrated environmental assessment and management. Environmental Modelling and Software. 47, 159–181.
- KIPTALA. J, MOHAMED. M, MUL. M, CHEEMA. M, VAN DER ZAAG. P, (2013). Land Use And Land Cover Classification Using Phenological Variability From MODIS Vegetation In The Upper Pangani River Basin, Eastern Africa. Physics and Chemistry of the Earth 66 112–122.
- KOCH, B., (2013). La teledetección como apoyo a los inventarios forestales nacionales EFN. SLU, FAO, 18 pp, Department Remote Sensing and Landscape Information Systems, Faculty of Forest and Environmental Sciences, Albert-Ludwigs University of Freiburg.
- LABRADOR. M, EVORA. J y ARBELO. M (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas. Gobierno de Canarias. Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Universidad de La Laguna IROA, S.A. ISBN: 13:978-84-695-3276-8
- LAROCQUE, G; BHATTI, J; ARSENAULT, A. (2014). Integrated modelling software platform development for effective use of ecosystem models. Ecological Modelling 288: 195-202.
- LEVI, S. (2006). GEOGRAFÍA HUMANA Y GEOMÁTICA. Boletim Goiano de Geografia. V. 26, nº 1, 11-29. Goiás - Brasil [consulta: 21/01/2017]. Disponible: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337127144001>> ISSN
- LILLESAND, T., KIEFER, W. Y CHIPMAN, J., (2015). Remote Sensing and Image Interpretation. 7th Edition. Willey, February 2015.
- LONDOÑO, A. (2012). Cambio de Uso del Suelo en el Altiplano (Oriente Antioqueño – Colombia) en los últimos 25 años. Universidad Internacional de Andalucía. 61 pp. España.
- LÓPEZ, J. Y GUEVARA, C., (2012). Análisis del cambio de tipo de cobertura en la microcuenca urbana hato de la virgen ubicada en el municipio de Ibagué, 8 pp, Colombia.
- LÓPEZ, V; PLATA, W. (2009). Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 2009. Núm. 68, pp. 85-101. [Consulta: 2010, Diciembre]. [Formato PDF].
- LOZADA. J, GUEVARA. J, HERNÁNDEZ. J, SORIANO. P Y COSTA. M, (2011). Los Bosques de la Zona Central de la Reserva Forestal Imataca, Estado Bolívar, Venezuela. BioLlania Edición Esp. 10:47-62

- LOZANO, E. (2006). Análisis de Cambio Multitemporal de Uso de la Tierra en la Cuenca Alta del Río Santo Domingo, Estado Mérida, Venezuela 2006. [Consulta: 2011, Enero]. [Formato PDF].
- LOZANO, O. (2008). Localización de áreas prioritarias de actuación para la ubicación de cortafuegos usando software libre GIS: gvSIG, SEXTANTE y PostGIS. [Consulta: 2012, Abril]. [Formato PDF].
- LUPP, M. (2007). OpenGis. Styled Layer Descriptor profile of the Web Map Service Implementation Specification. Version 1.1.0. OGC 05-078r4. [Consulta: 25/02/2017]. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/standards/sld>.
- MACEDO-CRUZ. A; PAJARES, G; SANTOS, M. (2010). Clasificación No Supervisada con Imágenes a Color de Cobertura Terrestre. Agrociencia,. Vol. 44, 711-722. [Consulta: 2011, Diciembre]. Disponible: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2010/ago-sep/ago-sep-10.html>
- MAGANTO. A, TORRADO. A Y AGUILERA, M. (2014). Nucleo Español de Metados (NEM) v.1.2. Grupo de Trabajo Técnico de Metadatos y Catálogo. Disponible: <http://metadatos.ign.es/web/guest/nem>
- MAGUIRE, D Y LONGLEY, P. (2005). The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures. Computers, Environment and Urban Systems. 29, 3-14.
- MAGUIRE, D.J., GOODCHILD, M.F. AND RHIND, D.W. (eds.) (1991) Geographical Information Systems: Principles and Applications. Avon, Longman Scientific and Technical.
- MANSON, R. & JARDEL, E., (2009). Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico, Capital natural de México, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México, pp. 131-184
- MARTÍNEZ DE ANTOÑANA, J. (2008). Pasado, Presente y Futuro de las Infraestructuras de Datos Espaciales. Bubok Publishing S.L. [Formato PDF].
- MARTÍNEZ, J. (2006). La Utilización del Software Libre y de los Formatos Abiertos en la Administración Pública. Revista de Derecho Informático, nº 96. ISSN 1681-5726.
- MARTÍNEZ, J. Y MARTÍN, M., (2010). Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. Red Nacional de Teledetección Ambiental, Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC), 67 pp, España.
- MARTINS, H Y ROCHA, J. (2012). Epidemiología Espacial de Língua Azul. Un enfoque integrado con el uso exclusivo de Software Libre. Revista FOSSGIS.

- Brasil 2012. Edición Nº 5, pp. 32. [Formato PDF]. Disponible: www.fossgisbrasil.com.br
- MASS, W. (2008). OpenGis. The Members of the Open Geospatial Consortium, Inc. (OGC). Version 1.0. Procesing Service (WPS) Interface Standard. [Consulta: 25/02/2017]. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/pressroom/pressreleases/843>.
- MATEOS, P (2013). Geovisualización de la Población: Nuevas Tendencias en la Web Social. Investigaciones Geográficas. Instituto Interuniversitario de geografía. Universidad de Alicante. Nº 60, pp. 87-100. ISSN: 0213 - 4691. eISSN: 1989 – 9890. DOI: 10.14198/INGEO2013.60.05
- MAYORAL, S. (2002). Infraestructura de datos geográficos para el desarrollo sostenible. Revista Fuentes Estadísticas. Fuentes Españolas - Revista Nº 64–2002. Disponible: <http://www.ine.es/revistas/fuentes/Numero64/paginas/15-16.htm>.
- MCLEOD, B. (2001). Recetario para Infraestructuras de Datos Espaciales (Traducción del Cookbook SDI v.2). Disponible: <http://redgeomatica.rediris.es/metadatos/publica/recetario/html/capitulo06.html>
- MENDOZA, G. Y GARCÍA, K., (2011). Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo en el Municipio de Manaure–Guajira-Colombia, Implementando imágenes landsat. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR. INPE, Brasil p.6442.
- MESAS-CARRASCOSA, F; SANTANO, D; MEROÑO, J; ORTÍZ, R; HIDALGO, R AND GARCÍA-FERRER, A. (2016). Monitoring Heritage Buildings with Open Source Hardware Sensors: A Case Study of the Mosque-Cathedral of Córdoba. Sensors 16, 1620; doi:10.3390/s16101620
- MOLINA, A (2016). Aplicación de la Fotogrametría Digital para la Representacion Tridimensional del Acueducto de Puça en Petrer (Alicante). Universidad de Alicante, España.
- MONJARDIN, S; PACHECO, C; PLATA, W; CORRALES, G; ROMERO, R Y BELTRAN, J. (2016). Determination and Analysis of Hot Spot Areas of Deforestation Using Remote Sensing and Geographic Information System Techniques. Case Study: State Sinaloa, México. Open Journal of Forestry, 6, 295-304. <http://dx.doi.org/10.4236/ojf.2016.64024>
- MUELLER, M. (2014). OpenGis. OGC 2.0. Interface Standard. Implementation Standard. OGC 14-065. Version: 2.0. [Consulta: 25/02/2017]. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/standards/wps>

- NATIONAL STATES GEOGRAPHIC INFORMATION COUNCIL (2009). A Strategic Framework for the National Spatial Data Infrastructure. Disponible: [http://www.nsgic.org/public_resources/Strategic-Framework-for-SDI_Final050109.pdf]: [Consultado: 30/5/2017].
- NAVARRO. J y SÁNCHEZ DEL RÍO. J (2000). Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la Explotación/Construcción de las Infraestructuras Viarias: El Estudio de la Línea de Alta Velocidad Entre Córdoba y Málaga. Papeles de Geografía, Nº 32. Pp. 127-140
- NEBERT, D (2004). Desarrollo de las Infraestructuras de Datos Espaciales: El Recetario IDE. Infraestructura Global de Datos Espaciales. Grupo MERCATOR.
- NEBERT, D. (2001). El Recetario IDE. Technical Working Group Chair, GSDI. Infraestructuras y Metadatos. Disponible: <http://redgeomatica.rediris.es/metadatos/publica/recetario/html/>. [Consulta: 2015].
- NEBERT, D. (2002). OpenGIS catalog services specification, Version 1.1.1. OpenGIS project document 02-087r3, Open GIS Consortium Inc. Disponible: <http://www.opengis.org>
- NEBERT, D. WHITESIDE, A. Y VRETANOS, P. P. (2007). OpenGIS Catalogue Service Specification, versión 2.0.2. OGC 07-006r1. (218 pp.). [Consulta: 20/12/2016]. Disponible: <http://redgeomatica.rediris.es/metadatos/publica/recetario/html/capitulo01.html>
- NICHOLS, S., AND COLEMAN. K (1999), Towards a conceptual framework architecture to support the Canadian Geospatial Data Infrastructure (CGDI), A Report for the GeoConnections Secretariat: [Consultado 30/5/2017].
- NIEVES, E. (2008). Geomática: Ciencia geográfica y tecnología aplicada al territorio. Universidad Autónoma de Guadalajara. Revista Académica Electrónica.
- NOGUERAS-ISO. J, ZARAZAGA-SORIA. F, BEJAR. R, ALVAREZ. P Y MURO-MEDRANO. P. (2005). OGC Catalog Services: a keyelement for the development of Spatial Data Infrastructures. Computers & Geosciences 199–209 pp.
- OGC (2014). Interoperability Program Initiative designated OGC Web Services. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/pressroom/pressreleases/2118>.
- OGC, (Open Geospatial Consortium), (2007). Geography Markup Language (GML). Encoding Standard, versión 3.2.1. Documento número 07-036. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>.
- OGC, (Open Geospatial Consortium). Última actualización (2011). [Consulta: 26/02/2017]. Disponible: <http://www.opengeospatial.org>.

- OGP-EPSG (2011). EPSG Geodetic Parameter Dataset.. [Consulta: 21/12/2016]. Disponible: <http://www.epsg.org>
- OGP-EPSG (2017). EPSG Geodetic Parameter Dataset. [Consulta: 05/03/2017].
- OLAYA, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. [Formato PDF]. Disponible: http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG [Consulta: 2011, Septiembre].
- OLIVA SANTOS, R. Y QUESADA OROZCO, E. (2006). Los metadatos geográficos: actualidad y estándares. Mapping. [Consulta: 22/01/2017].
- OLIVA, P; VERDÚ, F. (2009). Revisión de la Utilización de Distintos Índices Espectrales y Técnicas para la Cartografía de Áreas Quemadas en Imágenes MODIS. N° 1 pp. 129 – 140. 2009. [Formato PDF].
- ONU (Organización de Naciones Unidas) (1998). Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Protocolo de Kyoto. Disponible: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf> [Cosultado. 3/6/2017].
- ORDOÑEZ, C Y MARTINEZ-ALEGRIA, R. (2003). Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones Prácticas con Idrisi32 al Análisis de Riesgos Naturales y Problemáticas Medioambientales. Editorial Ra-Ma. ISBN 84-7897-543-8
- ORTIZ, G. "Tu web sobre Sistemas de Información Geográficas. (GIS-SIG). Página actualizada (2011). Disponible: <http://www.gabrielortiz.com/>. [Consulta: 2010, Marzo].
- PAYACAN, S; FORMAGGIO, A. (2005). Evaluación de datos del satélite CBERS para mapeamiento de áreas citrícolas a nivel municipal. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil. INPE, pp. 865-872. [Consulta: 2011, Enero]. [Formato PDF].
- PEÑA. D. (2001). El Derecho del Ciberespacio, Fundamentación Tecnológica en el Análisis del Derecho.
- PERCIVALL, G. (2002). ISO 19119 and OGS Service Architecture. En FIG XXII International Congress, Washington, D.C. EE. UU., (12 pp.). [Consulta: 6/03/2017]. Disponible: <http://www.fig.net/resources/publications/figpub/index.asp>.
- PERCIVALL. G, REED. C, LEINENWEBER. L, TUCKER. C. Y CARY T (2008). OGC Reference Model, versión 2.0.0. OGC 08-062r4. (35 pp.). [Consulta: 25/02/2017]. Disponible: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=31112
- PÉREZ, M. Y GARCÍA, M-P, (2013). Aplicaciones de La Teledetección en Degradación de Suelos. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 61, 285-308.

- PÉREZ, P; GONZÁLEZ, J; PALAZÓN, J. (2004). La Teledetección en la Planificación Territorial. Aplicación de Técnicas de Clasificación para la Elaboración de Cartografía de los Usos del Suelo. [Consulta: 2012, Junio]. [Formato PDF].
- PÉREZ-ORTIZ, M., PEÑA J., GUTIÉRREZ P., TORRES-SANCHEZ J, HERVÁS-MARTINEZ, C., LÓPEZ-GRANADOS, F. (2015). A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method. *Applied Soft Computing Journal*, 37, pp.533–544
- PINTO, Z. (2009). Infraestructura Global de Datos Espaciales (GSDI). Boletín informativo para Latinoamérica y el Caribe. 2009. Vol.6, N°12. [Formato PDF].
- PISANI, F. (2005). “La doble geografía de la Google Mapsmanía”. *El País.es*. Disponible: http://www.elpais.es/articulo/elpcibsem/20051222elpciblse_1/Tes/. [Consulta: 2006, Mayo].
- PLATA, W. & HINOJOSA, G., (2015). Change Analysis of Land Use and Urban Growth in the Municipalities of Culiacan and Navolato, Sinaloa, Mexico Using Statistical Techniques and GIS. *Journal of Geographic Information System*, 2015, 7, 620-630.
- PONS, J. (2009). Adaptación de la Información Cartográfica Local a las Infraestructuras de Datos Espaciales. [Formato PDF].
- PORTILLA, F., NOGUERA, M Y PACHECO, N (2014). Diagnóstico multitemporal de las áreas ambientalmente sensibles a la desertificación en la provincia del Azuay a partir del año 1982. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 20(2): 36-44. ISSN: 1390-3799.
- POSTEL. J. (1981). NCP/TCP Transition Plan, Network Working Group. RFC 801
- REYES. P. (2000). Información y Derecho: El Desafío de su Integración, VII Congreso Iberoamericano de Derecho Informático, Lima, pág. 246
- ROA, L. (2010). El Municipio Casacoima. [Consulta: 2011, Enero]. Disponible en: <http://www.aporrea.org/regionales/a103559.html>
- RODRÍGUEZ S., L (2007). Protocolo de Kyoto: Debate Sobre Ambiente y Desarrollo en las Discusiones Sobre Cambio Climático. *Gestión y Ambiente*, vol. 10, núm. 2, pp. 119-128. Universidad Nacional de Colombia.
- RODRÍGUEZ, A. (2008). Instituto Geográfico Nacional. (IGN). ISO 19115. Disponible; <http://metadatos.latingeo.net/> MetaDatos Información Geográfica. [Consulta: 2010, Octubre].
- RODRÍGUEZ, A., ABAD, P., ALONSO, J., SÁNCHEZ, A. (2006). La Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE): Un proyecto colectivo y globalizado. *Avances en las Infraestructuras de Datos espaciales*. Universidad Jaume I,

- Servicio de comunicación y publicaciones, 15-30. [Consulta: 26/02/2017]. Disponible:[http://www.cuenca.es/_GeoCuenca/documents/2007/Comunicacion%20IDEE%20\(Antonio%20Rodriguez\)%20.pdf](http://www.cuenca.es/_GeoCuenca/documents/2007/Comunicacion%20IDEE%20(Antonio%20Rodriguez)%20.pdf)
- RODRÍGUEZ, V. (2014). Accesibilidad Geográfica de la Población a la Red de Hospitales Públicos de Andalucía: Aportaciones Desde el Análisis de Redes. Universidad Pablo D Olavide. Sevilla, España.
- RODRÍGUEZ. A, ABAD. P, ALONSO, J Y SÁNCHEZ. A (2009). La globalización de la Información Geográfica. Cuadernos Internacionales para la Tecnología de Desarrollo Humano.
- ROMÁN, YC, CUESTA, OJ. (2016). “Comunicación y conservación ambiental: avances y retos en Hispanoamérica”. Revista Latina de Comunicación Social, Disponible: <http://www.revistalatinacs.org/071/paper/1082/02es.html>. 71, pp. 1 5 a 39. DOI: 10.4185/RLCS-2016-1082
- ROSET. R, AND RAMOS. N, (2012). Georreferenciación de mapas antiguos con herramientas de código abierto. Revista Catalana de Geografía. [Consulta: 2014, Septiembre]. [Formato PDF].
- RUIZ, M; PÉREZ, V. (2007). “Historia de Internet”. Página, Internet en didáctica de la matemática. Disponible: <http://www.terra.es/personal8/marilower/historia.htm>. [Consulta: 2007, diciembre 11].
- SALAS B, MARÍA (2011). Ordenación del territorio en Venezuela: incoherencias y contradicciones actuales. Versión On-line ISSN 2443-468X.
- SÁNCHEZ, R. (1995). Ordenador y discapacidad. Guía práctica para conseguir que el ordenador sea una ayuda eficaz en el aprendizaje y la comunicación. Madrid: CEPE.
- SCHAEFFER, B. (2008). Towards a transactional Web Processing Service (WPS-T). En Pebesma, E.,Bishr, M. y Bartoschek, T. (Ed.). GI-Days 2008. Proceedings of the 6th Geographic Information Days. IfGIprint, 32, Institut für Geoinformatik, Münster: Alemania. (27 pp). [Consulta: 25/02/2017]. Disponible:<http://www.gidage.de/archive/2008/downloads/acceptedPapers/Papers/Schaeffer.pdf>.
- SONNET, J. (ed.). (2005). OpenGIS Web Map Context Documents. Versión 1.1.0. OGC 05-005. [Consulta 25/02/2017]. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/standards/wmc>.
- STALLMAN, R. (2004). Free Software, Free Society: Selected Essays of Richard M. Stallman. Primera edición en castellano, Traficantes de Sueños: Traducción principal: Rowan, J; Sanz, D; Trinidad, L.

- STALLMAN, R. (2005). "Sistema operativo GNU - Fundación para el software libre (free software Foundation)". Disponible: <http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>.
- STAR. J AND ESTES .J (1990). Geographic Information Systems: An Introduction. Prentice-Hall.
- STAR. J AND ESTES. J (1990). *Geographic Information Systems: An Introduction*. Prentice-Hall.
- STORY, M. Y CONGALTON, R. (1986). Accuracy assessment: a users perspective. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 52, pp. 397-399.
- SUÁREZ. T. A, SUÁREZ. V. A, VÁZQUEZ. G. M Y VICENTE. L. A (2007). Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Oviedo, España.
- TAIT, M. (2005). Implementing geoportals: applications of distributed GIS. Computers, Environment and Urban Systems 29 (2005) 33–47.
- TAPIA-SILVA, F. (2014). Avances en geomática para la resolución de la problemática del agua en México. Tecnología y Ciencias del Agua. [Consulta: 22/01/2017]. Vol. V, núm. 2, marzo-abril de 2014, pp. 131-148. Disponible:<<http://w.redalyc.org/articulo.oa?id=353531987008>> ISSN 0187-8336
- TAYLOR, M; Reino Unido, NGDF. (2001). Metadatos - Descripción de datos geoespaciales. Recetario para Infraestructuras de Datos Espaciales IDE. Disponible: <http://redgeomatica.rediris.es/metadatos/publica/recetario/html/capitulo03.htm> [Consulta: 2009, Junio].
- THUNNISEN, H.A.M., NOORDMAN, E., (1997). National Land Cover Database of the Netherlands: Classification Methodology and Operational Implementation. Netherlands Remote Sensing Board, Delft, the Netherlands, pp. 95.
- TOMLIN, C (1990). Geographic information systems and cartographic modelling. Prentice Hall.
- VALDEZ, J; GONZÁLEZ, M; DE LOS SANTOS POSADAS, H. (2006). Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. Agrociencia, 2006. Vol. 40, 383-394. [Consulta: 2010-12-02]. Disponible: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2006/may-jun/may-jun-06.html>
- VAN ELZAKKER, C. (2000). "Use and Users of Maps on the Web", ICA Commission meeting, Knoxville.
- VOROVENCI. I AND MUNTEAN. M, (2013). Evaluation Of Supervised Classification Algorithms For Landsat 5 Tm Images. University of Alba Iulia. [consultation: 2014, November]. [Formato PDF].

- VRETANOS, P. (ed.). (2010). OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard, versión 2.0.0., OGC09-025r1 and ISO/DIS 19142. (253pp.). [Consulta: 18/12/2016].
- VRETANOS, P. (ed.). (2010). OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard, versión 2.0.0., OGC 09-025r1 and ISO/DIS 19142. (253pp.). [Consulta 25/02/2017]. Disponible: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=39967.
- WHITESIDE, A. Y GREENWOOD, J. (2010). OGC Web Services Common Standard, versión 2.0.0, OGC 06-121r9. (207 pp.). [Consulta: 20/12/2016].
- WYATT, A. (1997). La Magia De Internet. 1ra. Edición, México. Editorial McGraw Hill

REFERENCIAS COMPLEMENTARIAS DE INTERNET.

- BEAM – BROCKMANN. ESA (European Space Agency). [Consulta: 2010, Noviembre]. Disponible en: <http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam>
- CONSEJO SUPERIOR GEOGRAFICO. Disponible: <http://www.idee.es/web/guest/el-proyecto>.
- Dublin Core. Disponible: <https://sourceforge.net/projects/catmdedit/>.
- FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE (fgdc). Última actualización (Diciembre, 2011). Disponible: <http://www.fgdc.gov/>.
- FREE SOFTWARE FOUNDATION. Licencias libres. Disponible: <https://www.gnu.org/licenses/license-list.html#GNUGPL>
- GDAL (Geospatial Data Abstraction Library). 2015. Available: <http://live.osgeo.org/es/index.html>.
- GRASS (Geographic Resources Analysis Support System). 1999 – 2010. Disponible: <http://grass.fbk.eu/>
- GVSIG. Disponible: <http://www.gvsig.gva.es>
- HERRAMIENTA DE METADATOS. CatMDEdit. Disponible: <http://sourceforge.net/projects/catmdedit>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). [Consulta: 08/03/2017]. Disponible: http://www.icde.org.co/web/guest/mapas_geoservicios.
- IGN (Instituto Geográfico Nacional). [Consulta: 08/03/2017]. Disponible: http://www.idee.es/CatalogoServicios/CatServ/directorio_servicios.html.
- ISO/TC 211. (International Organization for Standardization, Geographic information/Geomatics). (2014). [Consulta: 15/03/2017]. Disponible:

- http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?comid=54904
- ISO/TC 211. (International Organization for Standardization, Geographic information/Geomatics). Lista de Normas ISO/TC. [Consulta: 15/03/2017]. Disponible: http://www.isotc211.org/pow_all.htm
- IPGH (Instituto Panamericano de Geografía e Historia). Disponible: <http://www.ipgh.org>.
- NASA Landsat Program, 2004, Landsat ETM+ scene L5001054_05419970930, SLC-Off, USGS, Sioux Falls, SD 57198-0001. [Consulta: 2010, Octubre]. Disponible: <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/>
- OGC, (Open Geospatial Consortium). Última actualización (2011). Disponible: <http://www.opengeospatial.org>
- OGC. (Open Geospatial Consortium). [Consulta: 25/02/2017]. Disponible: [http://www.opengeospatial.org/](http://www.opengeospatial.org)
- OGC. OpenGIS Catalogue Service Implementation Specification. [Consulta: 26/02/2017]. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/standards/specifications/catalog>.
- OGC. WFS Gazetteer Profile 1.0 SWG. [Consulta 25/02/2017]. Disponible: <http://www.opengeospatial.org/projects/groups/wfsgaz1.0swg>.
- QUANTUM GIS (QGIS). Open Source Geographic Information System (GIS). Disponible: <http://www.qgis.org/en/about-qgis.html>
- RED GEOESPACIAL DE AMERICA LATINA (GeoSur). Disponible: <http://www.geosur.info/geosur/>
- W3C (World WideWeb Consortium). Disponible: <http://www.w3c.es/>

ANEXOS





Land use mapping from CBERS-2 images with open source tools by applying different classification algorithms



Antonio J. Sanhouse-García ^{a,*}, Jesús Gabriel Rangel-Peraza ^b, Yaneth Bustos-Terrones ^b, Alfonso García-Ferrer ^a, Francisco J. Mesas-Carrascosa ^a

^a Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes, Universidad de Córdoba, Campus Rabanales, N-IV, km 396, Córdoba 14071, Spain

^b División de Estudios de Posgrado e Investigación – Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Culiacán, Juan de Dios Batíz 310, Col. Guadalupe, 80220, Culiacán, Sinaloa, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 March 2015

Received in revised form

22 September 2015

Accepted 10 December 2015

Available online 29 December 2015

Keywords:

Geographic information systems

Free software

Digital image processing

Land use classification

Forest management

Territorial administration

ABSTRACT

Land cover classification is often based on different characteristics between their classes, but with great homogeneity within each one of them. This cover is obtained through field work or by mean of processing satellite images. Field work involves high costs; therefore, digital image processing techniques have become an important alternative to perform this task. However, in some developing countries and particularly in Casacoima municipality in Venezuela, there is a lack of geographic information systems due to the lack of updated information and high costs in software license acquisition. This research proposes a low cost methodology to develop thematic mapping of local land use and types of coverage in areas with scarce resources. Thematic mapping was developed from CBERS-2 images and spatial information available on the network using open source tools. The supervised classification method per pixel and per region was applied using different classification algorithms and comparing them among themselves. Classification method per pixel was based on Maxver algorithms (maximum likelihood) and Euclidean distance (minimum distance), while per region classification was based on the Bhattacharya algorithm. Satisfactory results were obtained from per region classification, where overall reliability of 83.93% and kappa index of 0.81% were observed. Maxver algorithm showed a reliability value of 73.36% and kappa index 0.69%, while Euclidean distance obtained values of 67.17% and 0.61% for reliability and kappa index, respectively. It was demonstrated that the proposed methodology was very useful in cartographic processing and updating, which in turn serve as a support to develop management plans and land management. Hence, open source tools showed to be an economically viable alternative not only for forestry organizations, but for the general public, allowing them to develop projects in economically depressed and/or environmentally threatened areas.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The planning and management of natural resources for the spatial planning comprises among other aspects of a soil characterization study. This means, manage, analyze and handle large volumes of spatial information. For this reason, the use and management of geographic information systems (GIS), is essential for this task, thanks to its ability to store and process the data set. The information in these cases comes from primary or secondary

sources. In the first case, they are collected in the field through direct measurements. In the second case, there are those which come from documentation, maps, aerial photographs, radar images, satellite images, handled through the digital image processing as can be supervised classification methods among others (Chuvieco, 2007).

The supervised methods are effective and accurate in classifying satellite images. Due to they are based on mathematical algorithms, these methods can be applied at the individual pixel level or to image objects (groups of adjacent, similar pixels). Some of the more common classification algorithms used for supervised classification include the Minimum-Distance to the Mean Classifier, Parallelepiped Classifier and Gaussian Maximum Likelihood Classifier

* Corresponding author.

E-mail address: sanhave@yahoo.com (A.J. Sanhouse-García).

(Kamaruzaman et al., 2009).

Remote sensing data are widely used for the identification and classification of land cover. Satellite images are useful in many applications related to the monitoring of the environment, such as forestry, agriculture, hydrology, geology, etc. (Bosque et al., 1988). These images are classified according to the values of each pixel, they are divided and grouped together forming the so-called thematic classes. Pixels with similar spectral properties form part of the same class. The image classification for the soil characterization is based on the response of the different spectral signatures present in the terrestrial coverage, influenced in turn by the set of bands and the ability of the application to distinguish clearly between one and another spectral signature within the same image (Kiptala et al., 2013).

There are several methods for classifying satellite images, the most common so far offers good results, being this one, the supervised classification method. This method involves some specific algorithmic functionalities that through the software they are being run on are open source or not, and they will present different classification mathematical algorithms, such as the Bhattacharya algorithm, Maxver or maximum likelihood and Euclidean distance or minimum distance. The method requires prior knowledge of the land coverage types to guide the algorithm in its classifying process (Kamaruzaman et al., 2009). The accuracy of the classification by the supervised method is measured by assessing the accuracy of the results obtained in order to achieve maximum reliability by the user and to ensure their maximum quality on the part of the mapping producer (Macedo, 2012).

The digital classification of images requires operational methodologies, interpretable, transparent and likely to have a high degree of automation. In the land cover cartography, starting from remote sensing data, many methodologies have been used, mainly of parametric type (maximum probability algorithm). However, due to the high availability of data and consequence of high technological development, the classification algorithms have emerged as exact and efficient alternatives to the conventional parametric techniques in the land cover mapping (Vorovencii and Muntean (2013).

A transparent and operational methodology to analyze the digital information can be addressed using GIS software applications based on free solutions (Bonet et al., 2014). These tools promise an improvement in the economy, with respect to proprietary solutions (exclusive). Major trading houses develop complex algorithms and processes, optimize the physical resources in the handling of large volumes of data. However, these processes are linked to high costs in the software license acquisition, limiting its use and affecting the scientific research (Guillen et al., 2006). On the other hand, the initiatives based on open-source solutions constitute a viable economic alternative and sustainable at a local, regional, and national level. These are significant advantages over exclusive trading houses, among them; greater interoperability, free competition, and allows working on mutual collaboration between users and developers around the world. These types of licenses are classified according to their access degree and use in; GPL (General Public License), AGPL (Affero General Public License), MPL (Mozilla Public License), among others (Andrew and Laurent, 2004). In this sense, the software licensed under this mode makes it necessary to give a series of basic freedoms to the user, the availability of source code being the most important, which can automate and industrialize processes (Stallman, 2005).

Open access GIS software use Geospatial Data Abstraction Library (GDAL/OGR) in order to achieve a greater interoperability. This library represents a common framework between privative and open source software and it is the prime database engine of many applications, including MapServer, GRASS, QGIS, and

OpenEV. The use of this library guarantees a long term access to data stored by the system. This library is also used by OSSIM, Cadcorp SIS, FME, Google Earth, VTP, ILWIS, MapGuide and ArcGIS. GDAL/OGR multiplatform, based on open source X/MIT style, provides command line tools for converting and processing a wide range of geospatial data formats, both vector and raster. The most popular types of supported raster formats are GeoTIFF, Erdas Imagine, ESRI Grids, ECW, MrSID, while the supported vector formats are MapInfo (tab and mid/mif), ESRI Shapefile, ESRI Coverages, ESRI Personal Geodatabase, DGN, PostGIS, Oracle Spatial, and others (GDAL, 2015).

Currently studies have been developed aimed at environmental management and assessment using open source GIS tools such as Spring, Grass, GvSIG, Saga, Kosmo Quantum GIS, CNAE, (open source) MapServer, PostGIS, MySQL, OpenLayers (Altobelli et al., 2010; Ortiz, 2011). In many cases, the work carried out from these tools are usually published in the network through catalog services, according to the definition of the Open Geospatial Consortium (OGC), through the spatial data infrastructure (SDI) services (Martínez de Antoñana, 2008; Bonet et al., 2014). These services provide useful products for the final user, and contribute among other things with the decision-making processes (Olaya, 2011, Kelly et al., 2013). These services include real-time download and analysis of information, such as the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) images, USGS (Science for a Changing World), CBERS (ChinaBrazil Earth Resources Satellite), in order to promote research and development (Valencia and Anaya, 2009, Argañaraz and Entraigas, 2011).

This study proposes a low cost innovative methodology that allows the generation of thematic cartography of land use and types of coverage from satellite images and GIS tools based on open source code, in order to have an information system for the land planning and management when there are not enough resources. The information analysis includes different classification algorithms, they are filed in a data storage array and subsequently integrating models are built on the land use and their types of coverage. By automatization, the qualitative and quantitative aspects of the determined classes are also identified, as well as the space-time level of detail required for its evaluation (Larocque et al., 2014).

2. Material and methods

2.1. Study area

The study was carried out in the Sotillo and Casacima municipalities (Fig. 1) from the Monagas and Delta Amacuro states in Venezuela. These municipalities border to: Tucupita, (Delta Amacuro state), Uracoa and Libertador (Monagas state) on the north, Piar, Caroni, and Padre Pedro Chien (Bolívar state) on the south, Antonio Diaz (Delta Amacuro) on the east, and Libertador and Independencia (Anzoátegui state) on the west.

Casacima municipality, with an area of 2.929,69 km² and a population of 29.200 inhabitants (INE, 2014a), is geographically located in coordinates 07°46' – 10°04' N y 59°47' - 62°36' W, according to World Geodetic System 84 (WGS84) reference system. The main geological formations identified at the site, correspond to The Macizo Guayanés oriented to the south and Delta Del Orinoco located at the north (Lozada et al., 2011). The annual average temperature is 26,7 °C and a high rainfall with more than 2.000 mm every year is registered. Vegetation present in the study area is semi-arid forest type, with savannah areas (Roa, 2010).

The Sotillo municipality has an area of 1.939 Km² and a population of 20.510 inhabitants (INE, 2014b). This municipality is

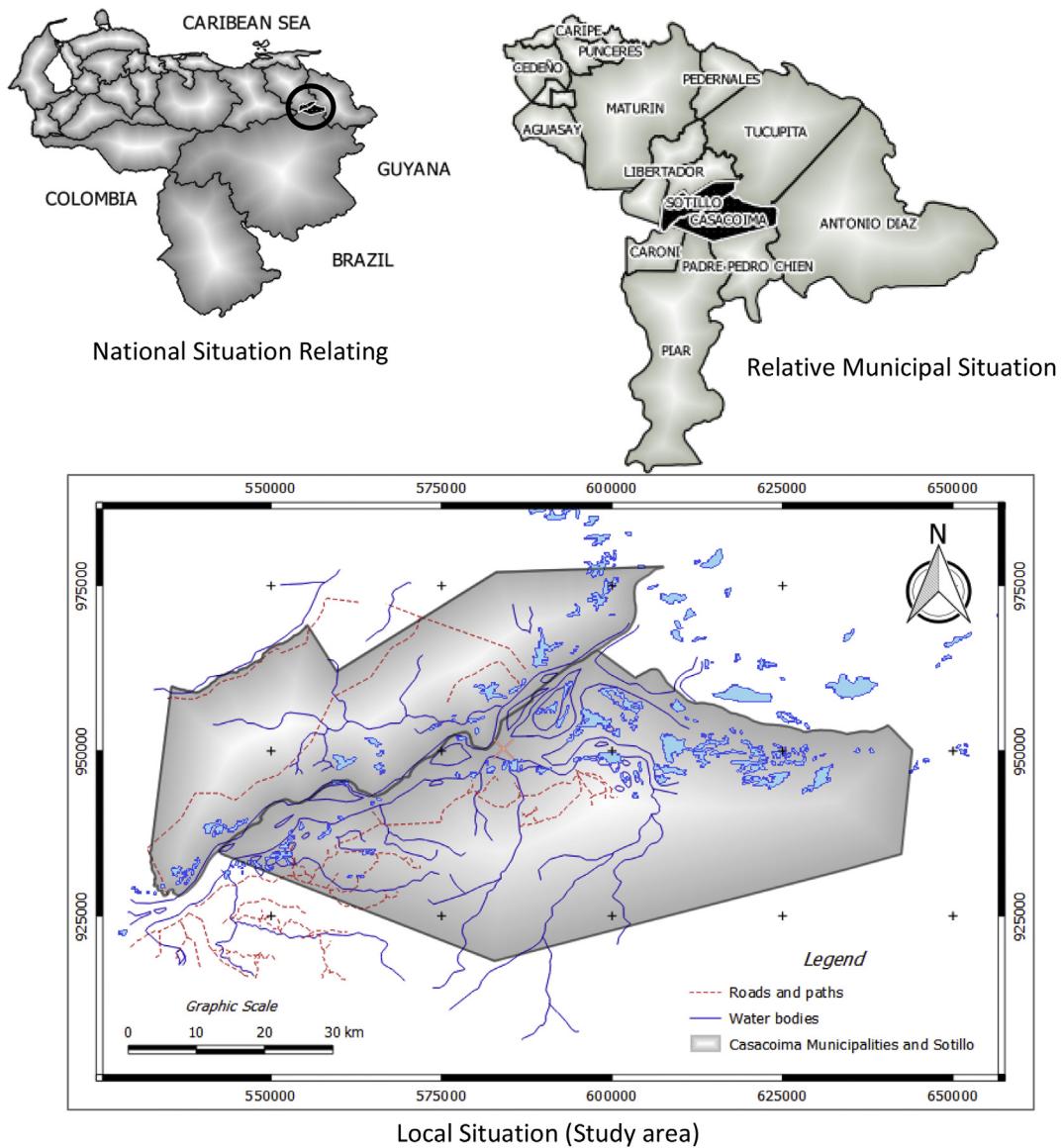


Fig. 1. Geographic location of study area.

located in the coordinates $08^{\circ}24' - 08^{\circ}54' \text{ N}$ y $62^{\circ}00' - 62^{\circ}44' \text{ W}$, according to WGS84 reference system. Two important physiographic units are present, Mesa Llana and Planicie Aluvial del Orinoco. The annual average temperature is $27.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, with an average rainfall of 1.116 mm every year. Vegetation is Savannah type, classified within dry tropical forest, with perennial grass. It has no hedgerows of bushes or arboreal elements. The savannah has moriche palm swamps and gallery forests (Lozada et al., 2011).

2.2. Basic geographic information

Basic geographic information was gathered from public administration through Venezuelan IDE website (IDEVEN, 2013) and Web Maps Services (WMS). Local cartographic information used to characterize land use and land covers was provided by Técnica Minera mining company (CVGTECMin). ChinaBrazil Earth Resources Satellite (CBERS-2) sensors were used to obtain open code and free access digital information from satellite images (INPE, 2012).

2.3. Open source tools

GIS software and utilities selection was based on the criterion that these tools were open source. Due to its useful, simple, and friendly interface, gvSIG and Spring tools were used in this study. These open source GIS tools would allow processing the largest number of file formats, both input and output from the interoperability and exchange of information point of view, through the cartography publication. gvSIG was developed by the Department of Infrastructure and Transport of the Valencian Generalitat – Spain (gvSIG, 2011) and it is considered as a thick client because of its ability to connect to wms, wfs and wcs servers. This software also allowed integration with locally stored data. This tool was used in the vector treatment for georeferencing and updating the basic geographic information of vegetation and land uses (gvSIG, 2011).

Once the basic local information cartography was georeferenced and updated, a Georeferenced Information Processing System called Spring was used (INPE, 2012). This open source tool integrates the geographic information in raster and vector mode under a unique environment. Spring consists of two modules,

Escarta and Impima. Escarta module allows the elaboration and printing of maps and Impima module manages the different file formats, which in turn allows processing satellite images (Camera et al., 1996).

2.4. Pre-treatment of the dataset

A second degree polynomial transformation model was implemented to georeference the local cartography. This transformation allows correcting the distortions and inaccuracies by mean of distorting the appearance of the document to fit the geometry of its new position. This transformation requires establishing Ground Control Points (GCP). According to Dávila and Camacho (2012) and Roset and Ramos, 2012 the greater the number of GCP is established the greater the accuracy is obtained.

Preliminary analysis of the basic vegetation cartography allowed generating the classes in a simplified way. These classes correspond to every study area. In this case seven thematic classes were deducted and correspond to Hydrology (A1), Urban Use (B2), Forestry Use (C3) Agricultural Use (D4), Forest Association (E5), Forest and Scrub (F6), and Forest with non-floodable grass (G7). This vegetation cartography, obtained from the field sampling by conventional procedures will be implemented afterwards as reference (terrestrial truth) to validate the obtained results through classification algorithms (Bernabe and Plaza, 2010).

Satellite images obtained from CBERS-2 platform were used in this study. Images with the least percentage of cloud coverage were chosen with the purpose of using the information as best as possible (Muñoz et al., 2007). For this study, the images obtained from the CBERS-2 platform operated with 5 spectral bands, with a spatial resolution of 20 m pixel size and a temporal resolution of 26 days. This situation implies that the information is generated every 26 days, covering a surface area of 113km (INPE, 2012). Land use and soil cover in the study area were determined by combining the information of different spectral bands.

2.5. Supervised and unsupervised classification methods

Features on the Earth reflect, absorb, transmit, and emit electromagnetic energy from the sun. Remote sensing technology using satellite imagery can be used to observe and monitor terrain features by means of measuring this energy. A measurement of energy commonly used in remote sensing is reflected energy or also called spectral reflectance (Kiptala. et al., 2013). Digital image classification techniques group pixels to represent land cover features based on the principle that the electromagnetic radiation reflected by

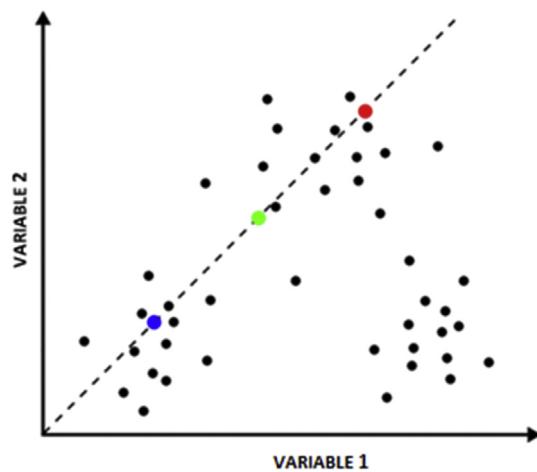


Fig. 3. Initial class definition using ISOSEG algorithm.

objects of the same nature is similar overall and these objects will thus have similar spectral properties (Fig. 2).

Two major categories of image classification techniques include unsupervised and supervised classification. Land cover classification based on the spectral signature previously defined for each land cover class of the digital image is known as supervised classification. Image classification where pixels are grouped based on the reflectance properties of pixels is called unsupervised classification.

In this study, the information of satellite images obtained from remote sensing was extracted through automatically extraction procedures. Extraction procedures were carried out using Open Source software (Spring) by means of classification algorithms commonly used with other non-free software (Olaya, 2011).

Initially, an unsupervised classification method was carried out in order to locate and identify homogenous areas (Camera et al., 1996; Conde et al., 2009). In particular, the ISOSEG classification algorithm was used order to classify regions of the segmented images. This is an unsupervised data clustering algorithm applied over a set of regions that are characterized at the same time by their statistical attributes (mean, covariance and surface area). It is a “clustering” algorithm, it does not imply any prior knowledge of the density distribution of category probability (Chuvieco, 2007). The purpose of using this algorithm is to group regions with similar statistical parameters (Fig. 3).

Unlike other classification algorithms, this method has some additional elements that allow a better control of classification

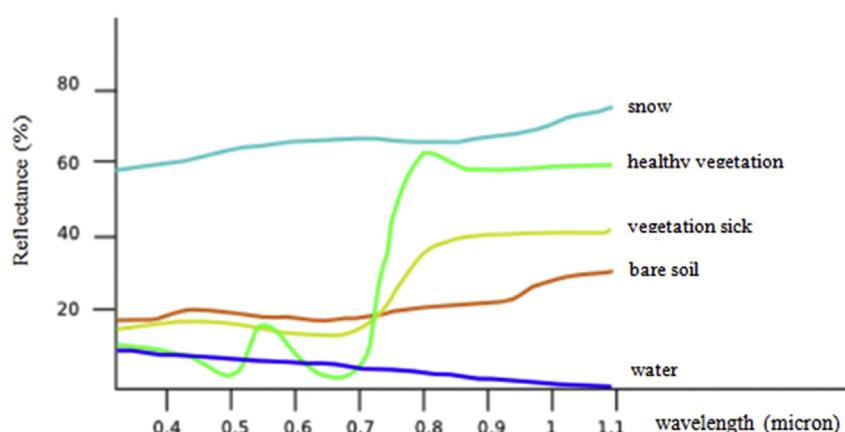


Fig. 2. Reflectance of some land covers.

process. These additional features include novel input parameters: the acceptance threshold and the number of iterations. The acceptance threshold is the maximum pixel percentage which class values are authorized to maintain without changes in each repetition. Using Mahalanobis distance, repetition uses the statistical parameters of the largest area regions to associate them to a class. The Mahalanobis distance should be less than the distance previously defined in the acceptance threshold. According to Payancan and Formaggio criterion (2005), the number of iterations was set to 5. The acceptance threshold was set at 95%, based on the established by Al-Ahmadi and Hames (2009). The results obtained by this methodology and the basic vegetation information provided by CVGTECMin, were applied to adequately validate the verification points corresponding to each class. A preliminary interpretation of image was carried out using these points, where possible changes in land use were identified.

The segmentation technique generated regions as a set of contiguous pixels dispersed bidirectionally. The technique used the similarity and pixel area parameters. Similarity criterion is based on determining the Euclidean distance between the average values of gray levels of both pixels. On the other hand, the pixel area corresponds to the minimum surface that a region can have. Two regions are considered to be different, if the distance between their average values is higher than the limit of similarity chosen. Since the cluster elements must be as similar as possible between them, and at the same time must be as different as possible from other cluster elements, the segmentation process is controlled by the similarity parameter based on distances (Riomoros, 2010). Small polygons were generated as representative samples using the generated regions. The same segmentation parameters were adapted regarding selection and identification of the test samples in the three classified algorithms used.

A comparison between Bhattacharya, Maxver (Maximum Likelihood Classification) and Euclidean Distance (minimum distance) classification algorithms was carried out for land use classification. The Bhattacharya algorithm estimates a probability density function from the values of the test samples obtained by the regions generated in the segmentation. Afterwards, the Bhattacharya distance is evaluated in each region. Bhattacharya distance measures the discrepancy between the two populations, hence, it is a measure of divergence between two multinomial distributions (Dos Santos et al., 2010) (Fig. 4). Parallel sides are defined by the mean and standard deviation of each variable in the class. The length of the parallel sides is twice its standard deviation. Furthermore, compared to other classification methods, the time to calculate is

very low in this classification. Here, in this classification, an unknown pixel based on the class category or that of decision, is classified (Safaralizade et al., 2014). This algorithm is represented by Equation (1):

$$B(pi, pj) = \frac{1}{2}(m1 - m2)^t \sum (mi - mj) + \frac{1}{2} \ln \frac{|\sum (mi - mj)|}{|\sum i|^{\frac{1}{2}} |\sum j|^{\frac{1}{2}}} \quad \text{EQ;}(1)$$

where: B is the distance from Bhattacharya; p_i and p_j are pixels of the i th and j th classes; m_i , m_j it refers to the average of class i and j , \ln ; is the neperian logarithm and i, j ; classes are in context.

Maximum Likelihood Classification is one of the most used "pixel by pixel" classification algorithms in the digital processing images (Barnabas and Plaza. 2010; Ahmad, 2012 and Gartzia, 2013). This algorithm considers the weighting of the statistical mean distances of the digital levels of each class. This classification method is based on mean and standard deviation statistical parameters which characterize a class. Taking into account these statistical parameters of a given element, it estimates the probability that these element belong to certain class (Fig. 5). The class with a higher probability, will be that at which the element is assigned (Olaya, 2011). The method is expressed on equation (2):

$$P_c = [-0,5 \log_e(\text{Det}(Vc))] - [0,5(X - Mc)^t(Vc)^{-1}(X - Mc)] \quad \text{EQ;}(2)$$

Where: P_c is the probability of a vector X (assigned); V_c corresponds to the covariance matrix of class (c) including bands ($k \dots L$); $\text{Det}(V_c)$ is the determinant of the covariance matrix V_c ; X is the vector measure of two unknown pixels; M_c is the vector measure for each class (c).

In the Euclidean distance method, the average spectral values are determined in each band and for each class. Once the pixel is specified and assigned to itself, the average spectral value of the selected samples of each class is compared to the average pixels and then the pixel is assigned to a class, having the least distance to that mean (Safaralizade et al., 2014). The method of minimum distance to the mean is mathematically easy and computationally efficient while it is not sensitive towards various change degrees in data with spectral response (Fig. 6). This algorithm is generally calculated using the Euclidean distance equation based on the Pythagorean Theorem (3):

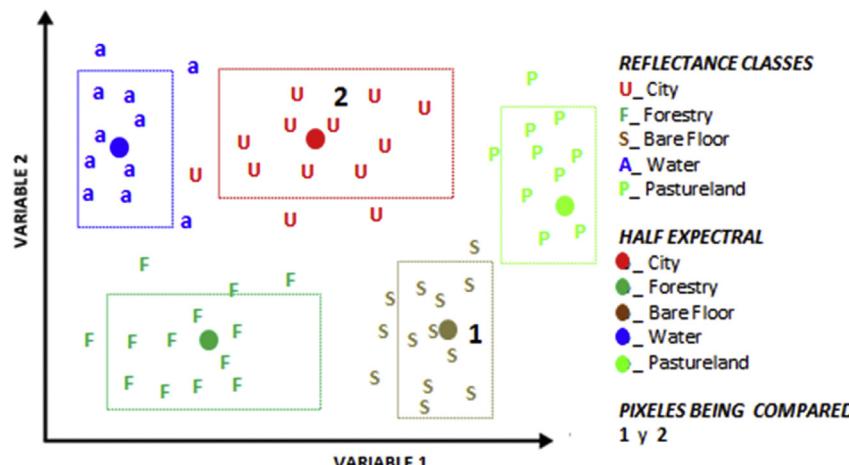


Fig. 4. Bhattacharya supervised classification algorithm.

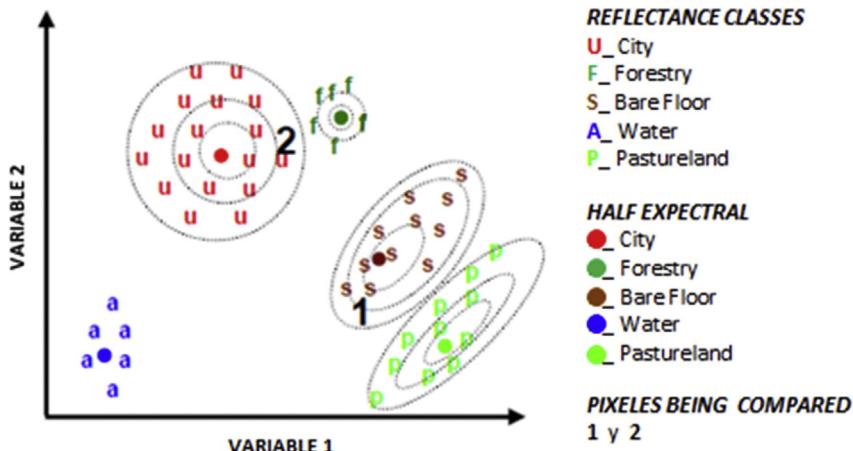


Fig. 5. Method supervised maximum likelihood classification.

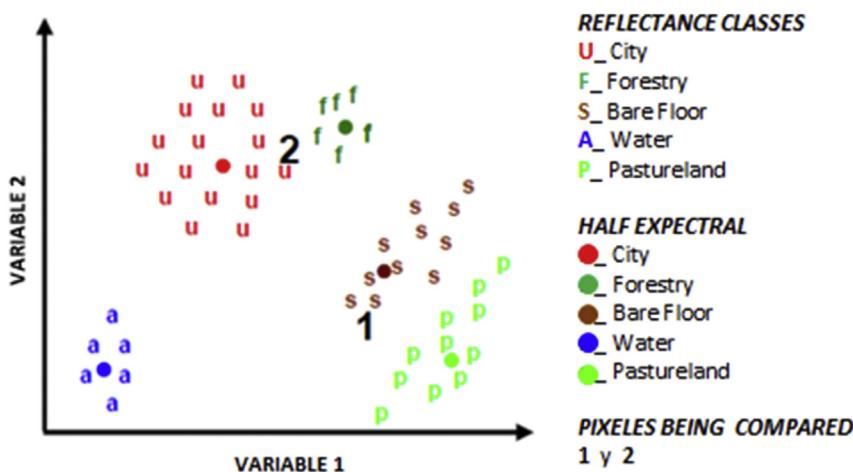


Fig. 6. Minimum distance (Euclidean distance) supervised classification method.

$$DIST = \sqrt{\sum (VB_{ijk} - \bar{x}_{ck})^2} \quad \text{EQ;(3)}$$

Where: DIST is the Euclidean distance; VB_{ijk} represents the brightness value in the line *i*, column *j* and band *k*; X_{ck} is the average of the class *c* and band *k*; C is the number of classes included in the classification; K is the number of bands included in the rankings.

For the aforementioned supervised classification methods, it was necessary to establish training zones. The training zone was used to train the classifier through the process of discrimination coverage. These zones were chosen in sufficient sizes for statistically characterizing the units they represent.

2.6. Validation of results

The accuracy of the different classification algorithms are determined by the matrix of confusion or error matrix. The results of the process of supervised classification were compared with the local data set. The error matrix measured objectively and quantitatively through the kappa index goodness of fit and quality of results obtained according to the classifier used. The goodness of fit test refers to the concordance degree between the image results and the terrestrial truth, obtained from the local data set (Macedo-Cruz et al., 2011). This index takes into account the pixels that have

not been correctly classified under the main diagonal (Vorovenciu y Muntean (2013)). The calculation for this index is based on (4).

$$\hat{k} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad \text{EQ;(4)}$$

where: r; number of rows in the error matrix, x_{ii}; number of observation in row *i* and column *i* (on the major diagonal), x_{*i*+}; total of observation in row *i* (shown as marginal total to right of the matrix), x + I; total of observation in column *i* (shown as marginal total at bottom of the matrix) and N; total number of observation included in matrix.

The accuracy of an image classification was determined by the calculus of the confusion matrix. The confusion matrix identifies the omission errors (user accuracy) and commission errors (producer accuracy). The map producer accuracy is obtained by dividing the number of successes by the total number of samples in a reference class (column). Meanwhile, user accuracy is obtained by dividing the number of successes by the total number of samples in an obtained class (rows). This process is one of the widest and most commonly used validation method for image classification, with open source tools as well as privative tools, not free (Macedo, 2012; Congalton and Green, 2009; Gartzia, 2013).

Validation using confusion matrix requires representative samples of the population evaluated. In this study, the samples

were determined using the multinomial equation (5). Small polygons as sampling units were selected in a stratified random way. The classes were considered different between them (strata), but with great homogeneity respecting their use (Macedo-Cruz et al., 2010).

$$\eta = \beta II_i(1 - II_i)/b_i^2 \quad \text{EQ;(5)}$$

where II_i is the fraction of surface corresponding to class i ; β is a coefficient determined by means of a Chi-square distribution, with a degree of freedom and $1 - \alpha/K$; given that k is the number of classes or categories and b is the desired precision ($b = 0,05$). In this study, β had a value of 7,2369, where $1 - \alpha/K$ was 0,007142857, K was 7 due to the number of classes used, with a confidence level b of 0,05.

3. Results and discussion

Local data (images) were georeferenced into a real coordinates system Universal Transversal Mercator (UTM) using open source tools. UTM projection was selected in this study because it has better positional accuracy compared with other coordinates systems, and UTM is the most commonly accepted mapping standard world-wide (Olaya, 2011). A second degree polynomial adjustment was carried out using the method of the least squares. The polynomial model was validated using Root Mean Square Error (RMSE) (Roset and Ramos, 2012). RMSE was used to estimate offset errors in georeferencing. This function is widely used in open source and proprietary software and it is shown in equation (6):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}{N}} \quad \text{EQ;(6)}$$

Where X represents the longitude x ; Y represents the latitude y .

A RMSE value of 0,479 m was obtained for the 10 ground control points selected. Some authors have obtained similar results using proprietary software (Chuvieco, 2007; Conde et al., 2009; Londoño, 2012). This result assures the accuracy level of image coordinates which in turn is related to an acceptable quality georeferencing. Therefore, the information obtained from the model has a good estimate of the uncertainty in correct positioning.

The supervised classification method using contour regions was applied for each of the operators classification used in the segmentation process. This algorithm operates iteratively by grouping together pixels which are neighbors and have similar values and



Fig. 7. Segmentation results in the study area.

splitting groups of pixels which are dissimilar in value (Bhosle and Pawar, 2013). After different tests, similarity values of 9 and minimum area of 12 (approximately 0,48 ha) were used (Fig. 7). These values agree with those reported by Payacan and Formaggio (2005), who used similar values in mapping citrus areas by using open access Spring software.

The validation of the different classification algorithms was done through the comparison of the vegetation inventory obtained by conventional procedures (ground truth), as a function of the previous knowledge in the study area. Unsupervised classification method grouped 26 subjects (different classes), slightly more than double established by local data. This preliminary classification provided the statistical basis for further adjustment in the supervised classification.

The different land cover types were identified by prior knowledge of the study area. Other types of coverage such as flooded forests and gallery forests were also identified based on information on their characteristics and location patterns. The supervised classification method generated consistent results and they agree with the information from local data set. The land cover and land use initial group were reduced from 26 classes to only 7. The sample size in this study was approximately 700 points and these samples were proportionally distributed among the resulting classes with a confidence level of 95% and an accuracy of 5%.

Consequently, the total sample by category was affected by the total of successes between the two methods of classification. The results obtained in this study differ from the results obtained by Vorovencii and Muntean (2013) who assured that the number of samples by category is maintained in each category without considering the type of classification algorithm used.

Bhattacharya algorithm showed a greater degree of separability, measured as the degree of overlap and scatter between two classes. A better match between classified classes and local data sets was observed. This method presented an overall reliability index of 83,93% and Kappa index of 0,81% (Table 1). In contrast, Maxver algorithm showed an overall reliability of 73,36% and kappa of 0,69% (Table 2) and Distance Euclidean algorithm revealed the weakest classification results with an overall reliability index of 61,17% and Kappa index of 0,61% (Table 3).

Supervised classification methods have been applied for several years, but their applications have been carried out by using proprietary software. Although it is true that some of these supervised classification methods have been being used for several years, it's also true that their execution had been mostly on privative license software, that is to say that these licenses, do not have the code source available, as other benefits to final users. This situation can be shown in Kiptala et al. (2013) who uses ERDAS Imagine to land use and land cover classification using phenological variability from MODIS, Gartzia (2013) used ArcGIS software version 9 to improve the accuracy of the classification in mountain areas and Bonet et al. (2014) used Matlab and ESRI server scripts to divulge ecological and analytical models.

The classification generated with the Bhattacharya algorithm showed a good behavior in each of the classified classes (Fig. 8). However, the map producer presented a slight confusion with this algorithm, respecting the other two classification algorithms. The map producer tried to classify the forest use class (C3) as if it belonged to the agricultural use class (D4). This spectral behavior is highly related to recently seeded smallholdings. Particularly in the forest case (C3), part of the land assigned for seeding in its initial stage is confused with agricultural land (D4) (Table 1).

According to the results obtained, agricultural use coverage was overestimated in Bhattacharya, Maxver and Euclidean distance algorithms with overestimated values percentages of 14,55%, 15% and 13,69%, respectively (Table 4). Agricultural use coverage classification

Table 1

Confusion matrix obtained with the algorithm Bhattacharya.

Classes	Categories or references classes							Total sampling	User precision (%)
	A1	B2	C3	D4	E5	F6	G7		
A1	95	0	0	0	0	0	2	97	97,94
B2	0	87	0	4	0	1	0	92	94,57
C3	0	0	81	14	0	0	1	96	84,38
D4	0	4	14	71	1	2	2	94	75,53
E5	0	0	0	0	64	3	0	67	95,52
F6	0	1	0	4	29	87	4	125	69,60
G7	0	2	0	2	1	2	86	93	92,47
Total Sampling	95	94	95	95	95	95	95	664	
Producer Precision (%)	100	92,6	85,3	74,7	67,4	91,6	90,5		

Table 2

Confusion matrix obtained with the algorithm Maxver.

Classes	Categories or references classes							Total sampling	User precision (%)
	A1	B2	C3	D4	E5	F6	G7		
A1	94	0	0	0	0	0	1	95	98,95
B2	0	81	3	16	0	1	0	101	80,20
C3	0	1	53	17	0	1	3	75	70,67
D4	0	6	34	46	0	1	1	88	52,27
E5	0	0	0	3	76	8	0	87	87,36
F6	0	1	0	2	16	52	12	83	62,65
G7	0	1	3	7	2	31	75	119	63,03
Total Sampling	94	90	93	91	94	94	92	648	
Producer Precision (%)	100	90	57	50,5	80,9	55,3	81,5		

Table 3

Confusion matrix obtained with the algorithm Euclidean Distance.

Classes	Categories or references classes							Total sampling	User precision (%)
	A1	B2	C3	D4	E5	F6	G7		
A1	95	0	0	0	0	0	2	97	97,94
B2	0	81	6	20	0	1	0	108	75,00
C3	0	0	54	17	1	1	40	113	47,79
D4	0	7	29	46	0	0	2	84	54,76
E5	0	0	0	3	68	10	0	81	83,95
F6	0	1	0	2	25	75	25	128	58,59
G7	0	5	6	7	1	8	27	54	50,00
Total Sampling	95	94	95	95	95	95	96	665	
Producer Precision (%)	95	86,2	56,8	48,4	71,6	78,9	28,1		

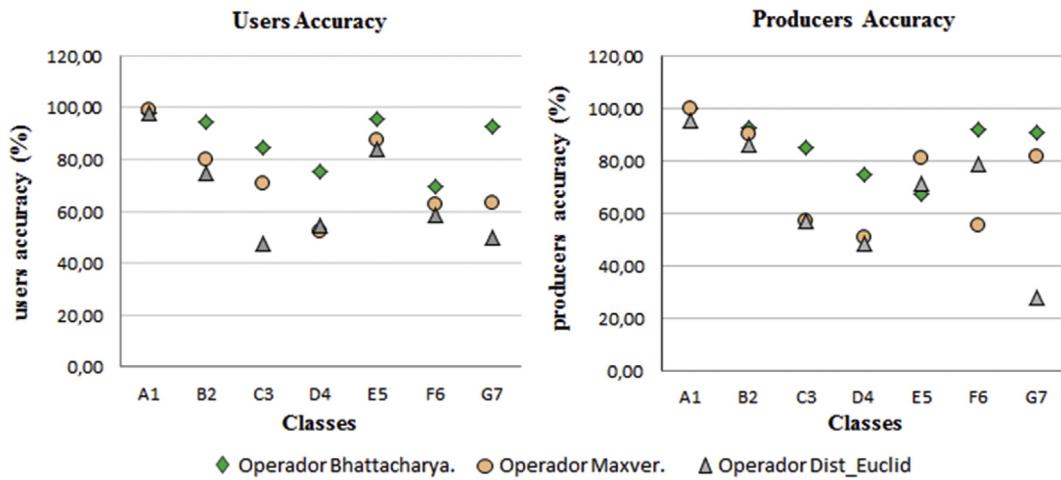
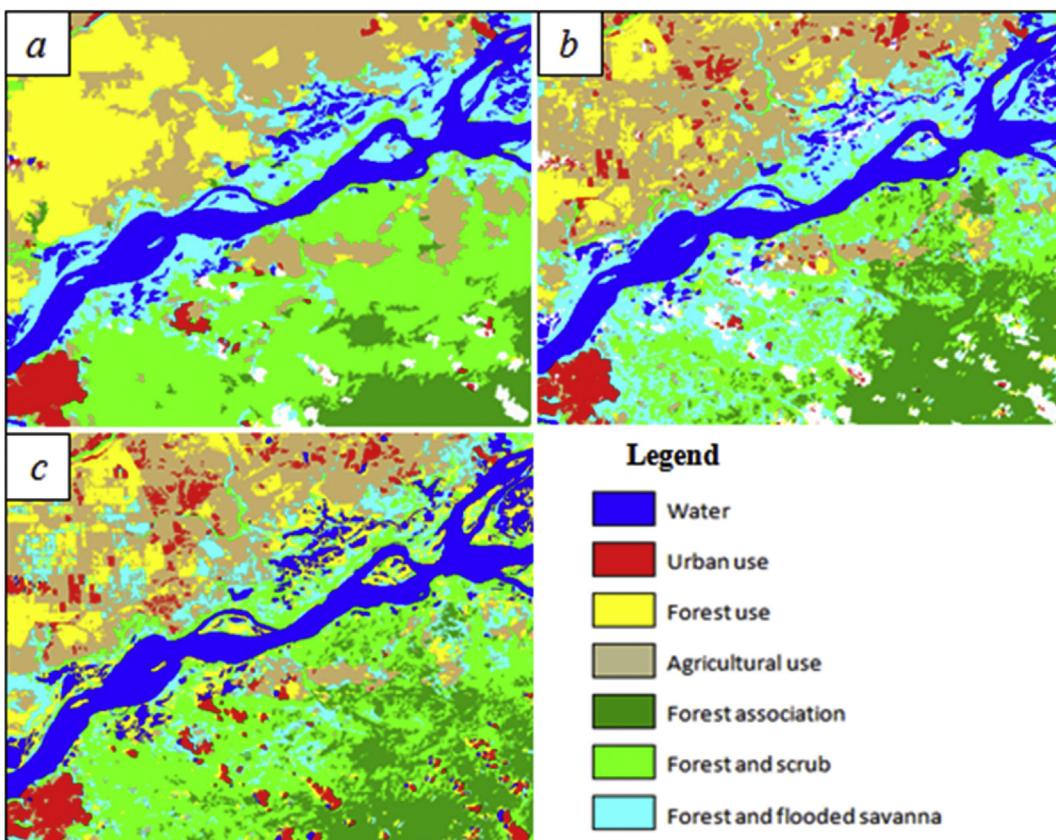
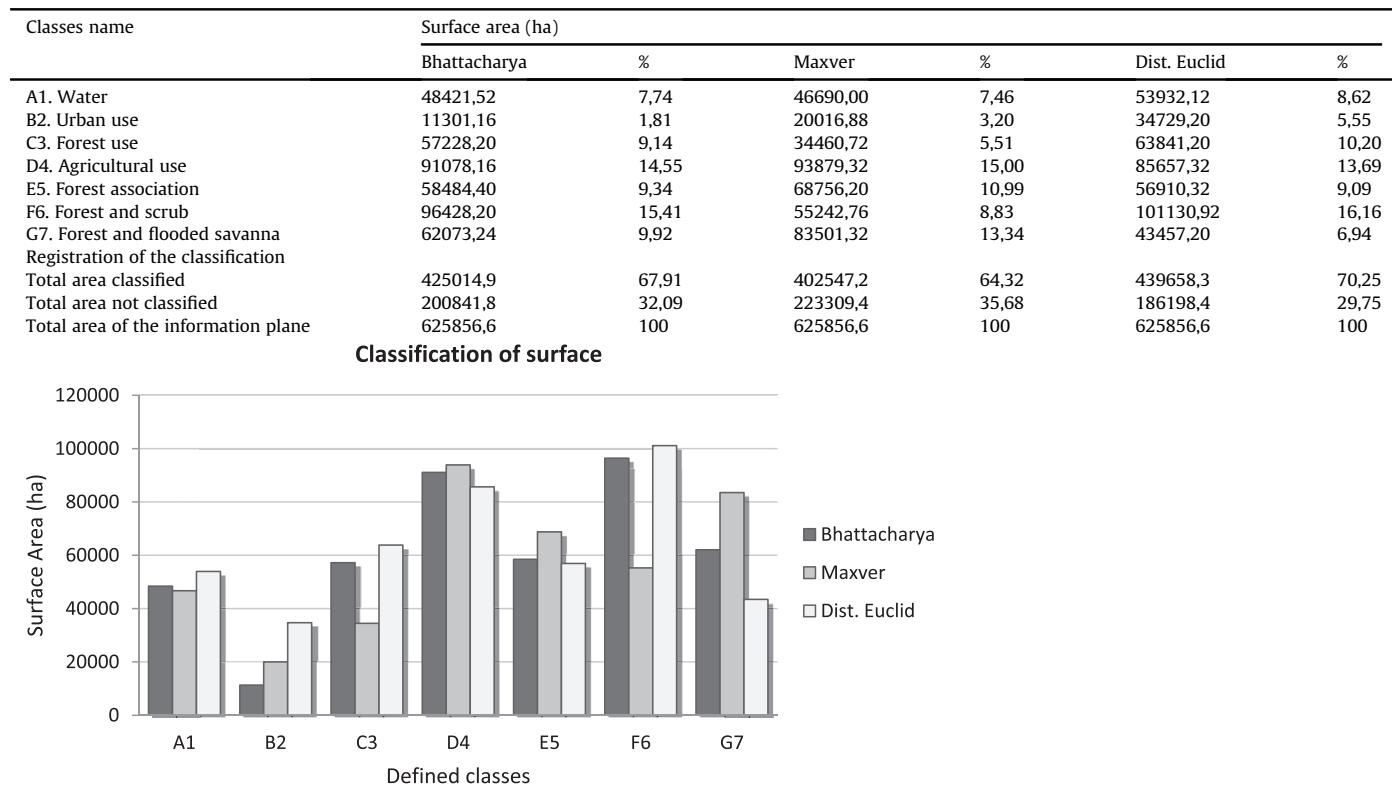


Fig. 8. Users and producers accuracies.

Table 4

Classification of surface area (ha) for the different algorithms used.

**Fig. 9.** Comparison between different methods of classification: a. Bhattacharya, b. Maxver (maximum likelihood), c. Euclidean Distance (minimum distance).

was also influenced by roads and unpaved roads, where algorithms classified such items as belonging to agricultural use class (D4). According to Thunnissen and Noordman (1997), Cheema and Bastiaanssen (2010), and Kiptala et al. (2013) the overall accuracy for the classification of large agricultural areas can vary in the range of 70%–85% both open access or proprietary software. Thus, the overall accuracy achieved in this study, using open source tools, is within the accuracy range for agricultural use classification.

Forest and scrub class (F6) showed coverage of 15,41% and 16,16% of the total area using Bhattacharya and Euclidean algorithms, respectively. However, this class showed only 8,83% of the total area when maximum likelihood classifier was used. This difference can be attributed to the relationship between forest and scrub class (F6) and forest association class (E5), where confusion is expected to occur at the intersection of both classes. On the other hand, Maxver algorithm overestimated forest with savanna and flooded grass class (G7) in 13,34% (Table 4, Fig. 9b). This situation is not related to the classification algorithm since Macedo-Cruz et al. (2010) also reported difficulties when attempting to classify shallow water bodies with grasses and it is correlated to seasonal weather conditions in study area.

Bhattacharya classification algorithms, Maximum likelihood and Euclidean distance, not presented area without rating with values of 32,09%, 35,68% and 29,75%, respectively. According to Olaya (2011), it is a common characteristic of the Bhattacharya classifier, in which there are elements that can not be classified because they do not fall into any parallelepiped (Table 4, Fig. 9a and b). Similarly, they may overlap and certain elements could also simultaneously belong to several classes.

The supervised classification carried out with the region-growth techniques applied in the segmentation process using Bhattacharya algorithm using open source software, presented a greater accuracy respecting to the other classification algorithms commonly used. When the error matrix is used as a starting point to identify possible error sources, it would be convenient to verify the human interpretation. This interpretation usually has a significant impact at the time of taking into consideration a thematic class as correct or not. In some cases, this impact is even more because developer field work experience is used as reference to evaluate results.

4. Conclusions

Classification of digital images was used to analyze the different types of coverage and land use. The classifications were conducted by means of three supervised classification algorithms on the basis of open source tools, images were used from satellites CBERS-2 of free access with 20 m spatial resolution. 7 classes of land cover were identified and the area for each one of them was evaluated. Three thematic maps were generated and the results obtained with each of the processes of classification were compared among them. The efficiency of the open source tools GvSIG and Spring was evaluated using the kappa obtained from the error matrix.

The results obtained by different classification algorithms from open source tools, showed without doubt its reliability from a functional point of view. The majority of the land use studies carried out with commercial software using several types of satellite images including the ones of free access, have reached global coefficients of kappa index between 0,64 and 0,89 (Kiptala et al., 2013). The kappa index achieved for this study was 0,81%, which according to the tab established by Dos Santos et al. (2010) represents a strong classification, of great relationship with the local data set. The Bhattacharya algorithm presented better performance in relation to the maximum likelihood and Euclidean distance, since it works with the regions of the segmented image and not on the “pixel to pixel” level as in the other cases. Some authors like;

Tingting and Chuang (2010) achieved a Kappa of 0,80 in the basin of the Chao Phraya River in Thailand, Redo and Millington (2011) reached a Kappa of 0,87 in their study in tropical areas and Vorovencii and Muntean (2013) obtained a kappa of 0,86, in the evaluation of classification algorithms. This makes it clear that the functionalities available to the free software are progressing day after day in its perfection, thanks to the constant and multitudinal interconnected community of users of all parts of the world.

Open source tools attend to those areas in development or with scarce resources in terms of cartographic production and updates. According to the results obtained in this study, it was demonstrated that better spatial resolution thematic maps were generated using open source code GIS software. These tools also ensure interoperability for different software systems. The acquisition of GIS software licensing is an important aspect to bear in mind in every project, in some cases it consumes most of the budget of the same. On the other hand, it is important to note that the analysis of information from remote sensing is quick, with relatively no cost and high reliability, which makes these tools a real alternative to study areas with possible scarce resources (Navarro et al., 2008). They also constitute an economically viable alternative for developing countries, most of the companies and state institutions use tools based on commercial solutions in the development of their projects as mentioned by López and Plata (2009); Pretel et al. (2010); Londoño (2012) among others. These solutions generate high costs in rights of software licensing acquisition, which is now one of the problems faced by many universities and state institutions. Based on the results, we can say that the proposed methodology clearly demonstrates that it is possible to generate low cost information sufficiently reliable and accurate for the GIS development and update the information of the existing resources. Facilitating this way, action on the part of the actors involved in the decision-making process to ensure an ecological balance in line with the land management plans.

Nevertheless, the classification of tropical forests presents a limiting in terms of the structural type “height”, which was not taken into account when it comes to the resulting classes. However, the Bhattacharya algorithm presented a higher overall reliability and Kappa index using the regions of the image as a contour training areas, indicating according to Payacan and Formaggio (2005); Conde et al. (2009); Bhosle and Pawar (2013), that classification by regions produces indexes that correspond best with the reality. It would be convenient for future projects to evaluate this limitation and study the feasibility of developing with the new LiDAR products using free software (fusion, lastools, GvSIG dielmo open, among others), they provide information on soil and their different strata allowing us to determine the height of the dominant canopy and the height that the undergrowth can reach.

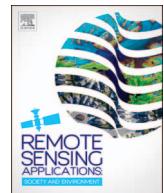
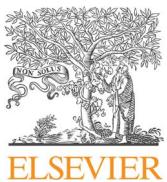
The technological alternatives developed with open standards and the geo-located spatial information play a very important role, they have been the starting point of many developed countries, where researchers, universities, territorial entities, and government agencies have been working. In this sense, developing countries such as the Bolivarian Republic of Venezuela, through competent public agencies should be available to users the necessary geographic information and decentralize it to state levels and even local. This situation would allow the free access to information at no charge, fostering the development and promoting new models of change.

Acknowledgments

We appreciate the support given to the Venezuelan Corporation of Guyana (Corporación Venezolana de Guayana, CVG) for the basic cartography and to the laboratory for advanced processing of satellite images (LPAIS) of Venezuela for such valuable information on the study area used for the present investigation.

References

- Ahmad, A., 2012. Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Appl. Math. Sci.* 6 (129), 6425–6436.
- Al-Ahmadi, F., Hames, A., 2009. Comparison of four classification methods to extract land use and land cover from raw satellite images for some remote arid areas, Kingdom of Saudi Arabia. *JKAU Earth Sci.* 20 (1), 167–191 [Consultation: 2014, October].
- Altobelli, A., Sgambati, A., Bader, F., Fior, G., Magajna, B., Ferrazzo, L., Braut, R., Urrutia, P., Ganis, P., Orlando, S., 2010. Application of gvSIG in a Study Related to Forest Fire Monitoring. Dipartimento di Scienze della Terra – Stazione Meteorologica di Trieste. Università degli Studi di Trieste for meteorological data. [Format PDF].
- Andrew, M., Laurent, St., 2004. Understanding Open Source and Free Software Licensing. In: Guide to Navigating Licensing ISSUES in Existing & New Software [Consultation: 2014, September].
- Argañaraz, J., Entraigas, I., 2011. Análisis comparativo entre las máquinas de vectores soporte y el clasificador de máxima probabilidad para la discriminación de cubiertas de suelo. *Rev. Teledetección* 36, 26–39 [Consultation: 2009, December]. [Format PDF].
- Bernabé, S., Plaza, A., 2010. A new system to perform unsupervised and supervised classification of satellite images from google maps. *Proc. SPIE* 7810, 781010 [Consultation: 2014, October].
- Bhosle, V., Pawar, V., 2013. Texture segmentation: different methods. *Int. J. Soft Comput. Eng. (IJSCCE)* 3 (Issue-5). ISSN: 2231–2307. [Consultation: 2014, October].
- Bonet, F., Pérez-Pérez, R., Benito, B., Suzart de Albuquerque, F., Zamora, R., 2014. Documenting, storing, and executing models in ecology: a conceptual framework and real implementation in a global change monitoring program. *Environ. Model. Softw.* 192e199.
- Bosque, S., Cebrian, M., Jiménez, B., et al., 1988. Aplicaciones de la informática a la Geografía y Ciencias Sociales. Síntesis, Madrid, p. 319. Available: <http://www.ub.es/geocrit/B3w-503.htm> [Consultation: 2008 January].
- Camara, G., Modesto, R., Freitas, U., Garrido, J., Mitsuo, F., 1996. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-oriented Data Modelling. Image Processing Division (DPI). National Institute for Space Research (INPE), Brazil. 20: (3) 395–403. [Consultation: 2010, February]. Available: <http://www.dpi.inpe.br/spring>.
- Cheema, M., Bastiaanssen, M.W.G.M., 2010. Land use and land cover classification in the irrigated Indus Basin using growth phenology information from satellite data to support water management analysis. *Agric. Water Manag.* 97, 1541–1552.
- Chuvieco, E., 2007. Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia, 3ra Edición, pp. 421–424.
- Conde, M., Perelman, S., Cerezo, A., 2009. Efecto de diferentes métodos de clasificación de imágenes satelitales sobre índices de paisaje. *Rev. Teledetección* 32, 5–13 [Consultation: 2011, January]. [Format PDF].
- Congalton, R., Green, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, second ed. CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA [Consultation: 2014, November].
- Dávila, F., Camacho, E., 2012. Georreferenciación de documentos cartográficos para la gestión de Archivos y Cartotecas. "Propuesta Metodológica". Instituto Geográfico Nacional [Consultation: 2014, September]. [Format PDF].
- Dos Santos, A., Oliveira, T., Suemi, N., 2010. Aplicaciones Prácticas con Spring. Biblioteca sectorial de ciencias agrarias, Universidad Federal do Espírito Santo, ES, Brasil. [Format PDF]. en: http://books.google.es/books?id=m3Vm2TCjM-MC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r#v=onepage&q=f=false.
- Gartzia, M., 2013. Vegetation classifications in mountainous areas. Mountain research and development (MRD). An Int. Peer-Reviewed Open Access J. Publ. By Int. Mt. Soc. (IMS) 33 (1), 63–74 [Consultation: 2014, October].
- GDAL (Geospatial Data Abstraction Library). 2015. Available: <http://live.osgeo.org/es/index.html>. [Consultation: 2015, December]
- Guillén, M., Hernández, M., Moreno De Larriba, J., Cruz, J., Aguilera, M., 2006. Primera Aproximación a la Utilización de las Imágenes de Satélite Aster para la Determinación Automática de la Leyenda Corine Land Cover. El Acceso a la Información Espacial y las Nuevas Tecnologías Geográficas. Granada. [Consultation: 2010, December]. Available: <http://age.ieg.csic.es/metodos/congresos/granada06.html>.
- gvSIG, 2011. Sistema de Información Geográfica de la Generalidad Valenciana. Manual de Usuario. Consejería de Infraestructuras y Transporte, España. Available: <https://gvSIG.org/web/projects/gvSIG-desktop/official/gvSIG-1.11/descargas>.
- IDEVEN, 2013. Infraestructura de Datos Espaciales de Venezuela [Consultation: 2013, July]. Available: http://www.geoportalb.gob.ve/geoportal_sitio/.
- INPE, 2012. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. CBERS, Satélite Sino - Brasileiro de Recursos Terrestres. Ministerio de Ciencia y Tecnología. [Consultation: 2012, January]. Available: <http://www.cbers.inpe.br/> <http://www.dgi.inpe.br/CDSR>.
- Instituto Nacional de Estadística (INE), 2014a. XIV Censo Nacional de Poblacion y Vivienda. Estado Delta Amacuro. Available: http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95&Itemid=9.
- Instituto Nacional de Estadística (INE), 2014b. XIV Censo Nacional de Poblacion y Vivienda. Estado Monagas. Available: http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95&Itemid=9.
- Kamaruzaman, J., Mohd Hasmadi, I., Nurul Hidayah, M.A., 2009. Spectral separability of tropical forest tree species using airborne hyperspectral imager. *J. Environ. Sci. & Engineering* 37–41 [Consultation: 2015, August]. [Format PDF].
- Kelly, R., Jakerman, A., Barreteau, O., Borsuk, M., ElSawah, S., Rizzoli, A., Voinov, A., 2013. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environ. Model. Softw.* 47, 159–181.
- Kiptala, J., Mohamed, M., Mul, M., Cheema, M., Van der Zaag, P., 2013. Land use and land cover classification using phenological variability from MODIS vegetation in the upper pangani river basin, Eastern Africa. *Phys. Chem. Earth* 66, 112–122.
- Larrocque, G., Bhatti, J., Arsenault, A., 2014. Integrated modelling software platform development for effective use of ecosystem models. *Ecol. Model.* 288, 195–202.
- Londoño, A., 2012. Cambios de Uso del Suelo en el Altiplano (Oriente Antioqueño-Colombia). Universidad Internacional de Andalucía [Consultation: 2014, September]. [Format PDF].
- López, V., Plata, W., 2009. Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990–2000. *Investig. Geográficas, Bol. del Inst. Geogr. UNAM* 68, 85–101 [Consultation: 2010, December]. [Format PDF].
- Lozada, J., Guevara, J., Hernández, J., Soriano, P.Y., Costa, M., 2011. los bosques de la zona central de la reserva forestal imataca, estado bolívar, venezuela. BioLlania Edición Esp. 10, 47–62.
- Macedo, A., 2012. Técnicas de clasificación automática de uso de suelos agrícolas y forestales basadas en imágenes digitales. Universidad Complutense de Madrid [Consultation: 2014, November].
- Macedo-Cruz, A., Pajares, G., Santos, M., Villegas-Romero, I., 2011. Digital image sensor-based assessment of the status of Oat (*Avena sativa* L.) crops after frost damage. *Sensors* 11, 6015–6036 [Consultation: 2014, October].
- Macedo-Cruz, A., Pajares-Martinsanz, G., Santos-Peña, M., 2010. Clasificación No Supervisada con Imágenes a Color de Cobertura Terrestre. *Agrociencia* 44, 711–722 [Consultation: 2010, December]. Available: <http://www.colpos.mx/agrocienc/Bimestral/2010/ago-sep/ago-sep-10.html>.
- Martínez de Antoñana, J., 2008. Pasado, Presente y Futuro de las Infraestructuras de Datos Espaciales. Bubok Publishing S.L. [Format PDF].
- Muñoz, C., Acevedo, P., Salvo, S., Fagald, G., Vargas, F., 2007. Detección de incendios forestales utilizando imágenes NOAA/16-LAC en la Región de La Araucanía, Chile. *Rev. Bosque.* 28 (2), 119–128 [Consultation: 2010, December].
- Navarro, R., Hayas, A., García-Ferrer, A., Hernández, R., Duhalde, P., González, L., 2008. Caracterización de la situación posincidente en el área afectada por el incendio de 2005 en el Parque Nacional de Torres del Paine (Chile) a partir de imágenes multiespectrales. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 81, 95–110 [Consultation: 2009, December].
- Olaya, V., 2011. Sistemas de Información Geográfica [Format PDF]. Available : http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG [Consultation: 2011, September].
- Ortiz, G., 2011. Tu web sobre Sistemas de Información Geográficas. (GIS-SIG). Página actualizada. Available: <http://www.gabrielortiz.com/> [Consultation: 2009, March].
- Payacán, S., Formaggio, A., 2005. Evaluación de datos del satélite CBERS para mapeamiento de áreas cítricas a nivel municipal. In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, (2005). INPE, pp. 865–872 [Consultation: 2009, January]. [Format PDF].
- Pretel, R., Duque, C., Calvache, M., 2010. Efectos de los Cambios de Uso del Suelo Sobre la Recarga del Acuífero Motril-Salobreña. *Geogaceta* 49.
- Redo, D., Millington, A., 2011. A hybrid approach to mapping land-use modification and land-cover transition from MODIS time-series data: a case study from the Bolivian seasonal tropics. *Remote Sens. Environ.* 115, 353–372.
- Riomoros, M., 2010. Segmentación Automática de Texturas en Imágenes Agrícolas. Proyecto Fin de Máster en Sistemas Inteligentes. Universidad Complutense de Madrid Facultad de Informática. [Consultation: 2014, October].
- Roa, L., 2010. El Municipio Casacoima [Consultation: 2011, January]. Available: <http://www.aporeo.org/regionales/a103559.html>.
- Roset, R., Ramos, N., 2012. Georreferenciación de mapas antiguos con herramientas de código abierto. *Rev. Catalana Geogr.* XVII (45) [Consultation: 2014, September]. [Format PDF].
- Safaralizade, E., Husseinzade, R., Pashazade, G., Khosravi, B., 2014. Assessing the accuracy of the pixel-based algorithms in classifying the urban land use, using the multi spectral image of the IKONOS satellite (Case study, Uromia city). *Int. Lett. Nat. Sci.* 11, 40–56.
- Stallman, R., 2005. Sistema operativo GNU - Fundación para el software libre (free software Foundation). Available: <http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>.
- Thunnissen, H.A.M., Noordman, E., 1997. National Land Cover Database of the Netherlands: Classification Methodology and Operational Implementation. Netherlands Remote Sensing Board, Delft, the Netherlands, p. 95.
- Tingting, L., Chuang, L., 2010. Study on extraction of crop information using timeseries MODIS data in the Chao Phraya Basin of Thailand. *Adv. Space Res.* 45 (6), 775–784.
- Valencia, G., Anaya, J., 2009. Implementación de la Metodología Corine Land Cover (CLC) con Imágenes Ikonos. *Rev. Ing. Univ. Medellín* 8 (15), 39–52. [Consultation: 2011, December]. [Format PDF].
- Vorovencii, I., Muntean, M., 2013. Evaluation of Supervised Classification Algorithms for Landsat 5 Tm Images. University of Alba Iulia [Consultation: 2014, November]. [Format PDF].



Multi-temporal analysis for land use and land cover changes in an agricultural region using open source tools

Antonio J. Sanhouse-Garcia^a, Yaneth Bustos-Terrones^a, Jesús Gabriel Rangel-Peraza^{a,*}, Alberto Quevedo-Castro^a, Carlos Pacheco^b

^a División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Culiacán, Juan de Dios Batíz 310, Col. Guadalupe, 80220 Culiacán, Sinaloa, México

^b Departamento de cartografía y fotogrametría, Universidad de los Andes (ULA), Casco Central, Avenida 3 Independencia, Diagonal Plaza Bolívar, Mérida, Venezuela



ARTICLE INFO

Keywords:

Multi-temporal land change analysis
Land use classification
Land cover
Landsat TM
ETM and OLI imagery
Digital image processing
Culiacan river basin

ABSTRACT

Sinaloa has the highest percentage of agricultural land with irrigation systems in Mexico. Due to its economic contribution, the exportation of fresh fruits and vegetables represent one of the most important activities in this region. Natural and/or anthropogenic activities in this area result in the loss of soil due to erosion process, which greatly reduces its productivity. A tool that enables an integrated management for a rational use and preservation of water resources and a proper management and planning of the territory is proposed in this study. With the purpose of assessing the changes in land use and land cover that occurred during the periods 1990–2000 and 2000–2014, a methodology that combines the use of digital classification techniques from images, geographic information systems (GIS) and statistical analysis was used. Transition matrix analysis was used in order to distinguish those changes as a product result of the transitions. Exchange rate results obtained in this study showed the occurrence of significant land cover changes for both study periods. The results showed that the changes detected in the Culiacan river basin were determined by the direct influence of anthropogenic activities. Loss surface area was observed, mainly for coniferous forest, tropical deciduous forest, induced pasture classes. In addition, the methodology used could identify gains, losses, and annual net change transitions and the intensity of these transitions in each category. Other types of non-natural land covers also increased (i.e. agricultural and urban area classes), modifying the biophysical landscape, especially in the 1990–2000 period. The change rate during this period was 52% of the initial total surface area. However, this loss rate was reduced to 41% during 2000–2014. Based on the results obtained, open source tools showed their potential on the image digital processing.

1. Introduction

The planning and management of natural resources includes, among other aspects, a study of land characterization and analysis. Land characterization includes the analysis and handling of large volumes of spatial information in order to have the enough information from the land cover. This information may be used to explore large areas in short times and to determine the possible changes that have occurred through time series (Chuvieco, 2007).

Forests and jungles in Latin America had been reduced by more than 50% of its original cover in 2000. Countries such as Brazil, Mexico, and Costa Rica showed the most significant alterations (FAO, 1996). Once human beings are established in a region, there is a need to make use of the surrounding resources available. In this way,

changes in environment are made in order to carry out productive activities for their livelihood. Such ecosystems transformations have been suffering for decades, mostly due to land cover changes in its composition and extent (Ruiz et al., 2013; SER, 2004).

Sinaloa has a varied and important biodiversity and a lot of livestock, agricultural, aqua cultural, industrial and commercial tourism, and forest resources. Dynamism of these activities has changed and fragmented landscape (Corrales et al., 2014). The municipality of Badiraguato has been experiencing a similar urban expansion in the past two decades, which leads to a displacement of population from their location towards the surroundings of the municipality, where social and environmental problems have been accentuated (INEGI, 2010). This urban development could result in land use changes, affecting the ecosystem and causing an ecological imbalance in the

* Corresponding author.

E-mail address: jesus.rangel@itculiacan.edu.mx (J.G. Rangel-Peraza).

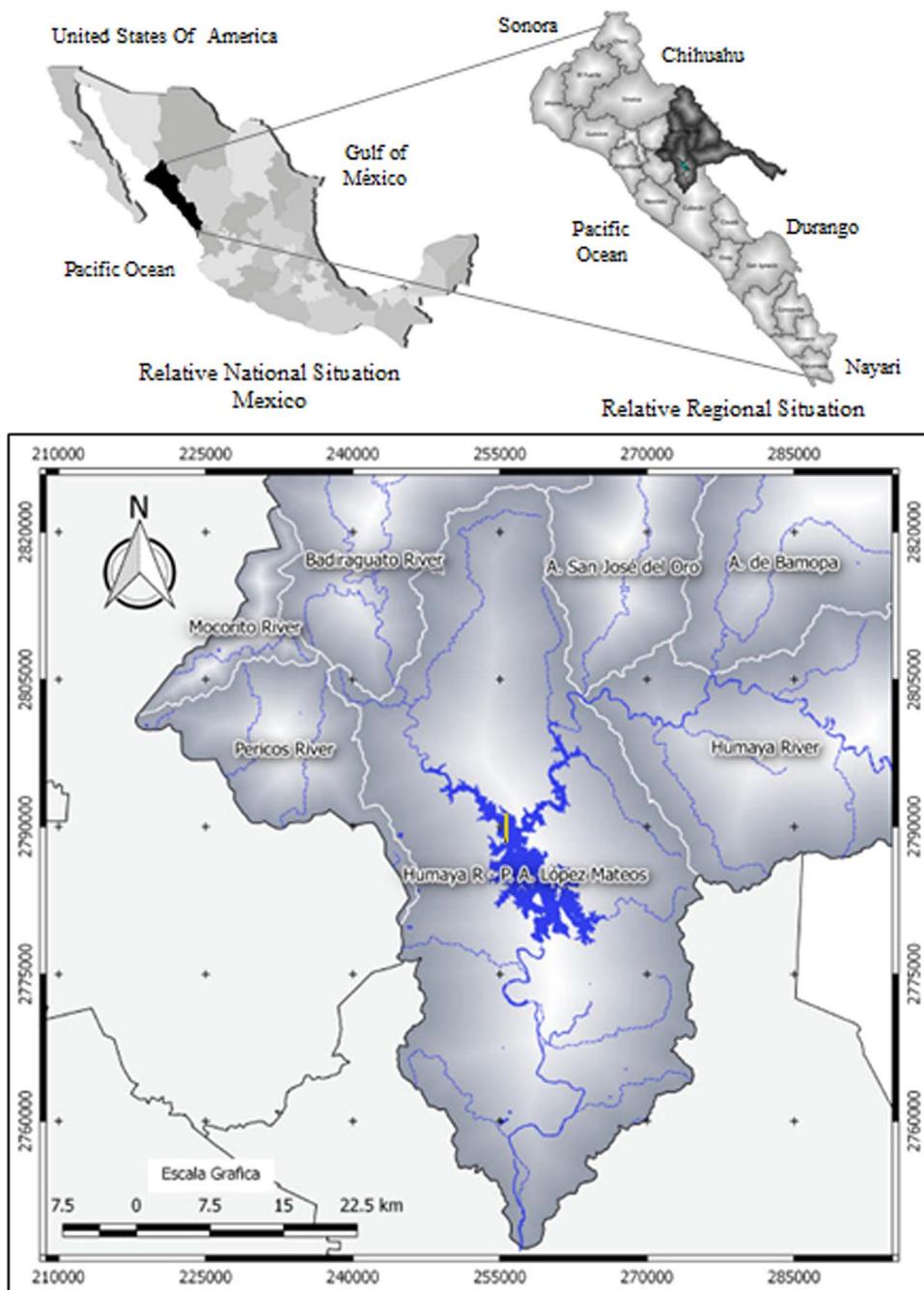


Fig. 1. Location of Culiacan river basin and Lopez Mateos dam (prepared by authors).

region.

Sinaloa is located in an irrigated region of Mexico, an agricultural system that covers large areas of arid lands across the northern and central regions of this country. The presence of irrigation infrastructure allows a relatively high degree of intensification in agricultural production (WBG, 2014). Culiacan River Basin, located in the municipality of Badiraguato, presents rural areas with a high productivity based on agricultural and livestock activities. According to a regional study carried out in 2010, the surface area is affected by both, natural (i.e. fires and frequent frosts) and unnatural causes (i.e. deforestation) resulting in continuous and rapid changes in land use that modify the structure of the landscape (CONAFOR, 2010; Pineda et al., 2009).

Changes in the landscape mosaic are the result of complex interactions between physical, biological, economic, political, and social factors (Meyer and Turner, 1994; Bocco et al., 2001). Thus, a

comparative objective analysis study that shows the status of territorial management by natural or anthropogenic changes is needed, in order to improve understanding of patterns and processes under which the dynamics of changes are regulated (Aldwaik and Pontius, 2012). The multi-temporal land use and land cover analysis measure and evaluate the landscape change during a period of time. According to Lillesand et al. (2015), these changes should be measured with at least five years apart.

In the present study, two periods 1990–2000 and 2000–2014 were evaluated, considering three aspects: a detection of occurred changes, an identification of the nature of the observed changes, and a measurement of the changed area. These aspects required the application of techniques to monitor and properly assess the surface area over time.

Spatiotemporal analysis using a combination of remote sensing

techniques, geographical information systems (GIS) and statistical analysis has shown its potential in characterization studies of land cover, which integrates the resulting information to support the decision making process (Araya and Cabral, 2010; Rodriguez-Galiano and Chica-Olmo, 2012; Ruiz et al., 2013; Kiptala et al., 2013). Satellite images are useful in many applications related to environmental monitoring. Through digital processing, they are classified depending on the response of different spectral signatures present in land cover, influenced in turn by all bands and by the ability to clearly distinguish between two spectral signatures within the same image (Lillesand et al., 2015).

Land use and land cover change studies in Mexico differ from each other in the methods used. Some studies do not define the parameters and variables used, or do not match in terms of the categories used. Consequently, an explanation of the changes is not adequately addressed. In some studies, net changes are computed, but a lack of analysis in transitions that occurs between categories is identified (Osuna-Osuna et al., 2015 and Loya-Carrillo et al., 2013). Despite this, the dynamics of land use changes in different periods were understood by using remote sensing data and GIS.

This study uses statistical techniques to determine the occurred changes and to assess the land use dynamics through transitions occurred in the periods 1990–2000 and 2000–2014 in the Culiacan river basin. The aim of the study is to detect significant changes between categories of land occupation by means of a comparison between the observed and expected changes and computing gains, losses, exchanges, net changes, and significant systematic transitions that have occurred. Land use and land cover change detection analysis will provide essential information for planning and management of natural resources at different scales and will help the decision-making process. This study proposes an operational, transparent, and low cost methodology which integrates digital classification techniques, GIS, Landsat images, and GIS solutions based on free applications.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The municipality of Badiraguato has a surface area of 5864 km², representing 8.70% of the total surface area of the state. It is the second largest municipality of the state of Sinaloa, Mexico. A large part of its territory is crossed by the Sierra Madre Occidental, one of the most important mountain ranges in Mexico. The municipality is located to the northeast of the state between the meridians 106° 51' 40" and 107° 40' 30" (west longitude) and between the parallels 25° 13' 54" and 26° 17' 56" (north latitude) (Fig. 1).

The municipality is bordered to the north by the municipality of Sinaloa de Leyva and the municipality Guadalupe y Calvo of the state of Chihuahua; to the south by the municipalities Culiacan and Mocorito; to the east by the states of Durango and Chihuahua; to the west by the municipalities of Mocorito and Sinaloa de Leyva. Its altitude fluctuates between 150 and 2300 m above sea level. The study area has a mountainous geography (Fig. 2). Its physiography is crossed by a high sierra with deep canyons (72.03%), low mountains (20.07%), highlands (2.50%), large plateaus with ravines (2.11%) and low sierra (1.89%) (SEPU, 2014). The municipality is integrated by more than 530 locations, among the main ones; Badiraguato, Surutato, Boca de Arroyo, and El Huejote (González, 2013).

Badiraguato presents a warm humid climate toward the center and south, with summer rains. From center toward the north, the climate is semi warm sub humid, with rains in summer. The average annual temperature is 24.5 °C with a minimum of 2 °C and maximum of 44.5 °C. Frosts are frequent in the highest elevation areas, with possible snowfalls in winter. The mean annual rainfall is 698.9 mm per year and the prevailing winds are oriented in a northeast direction, with a mean speed of 2 m s⁻¹ (INEGI, 2010). The predominant

vegetation is tropical deciduous forest (46.60%) in the lower and central parts of the municipality, with small areas of pine-oak and pine forests (43.80%) toward the northwestern part of the municipality, and a small presence of grasslands (1.93%).

Part of the land is intended for agricultural activities (INEGI, 2015). Its water resource is the Badiraguato river, which starts in the western part of the municipality formed by streams of the Santa Cruz and Huejote rivers. The Badiraguato river flows eastwards from the state of Durango and penetrates to the municipality by its southeastern part; its main tributary in the municipality is the Belmopan stream. The confluence of Badiraguato and Humaya rivers forms Adolfo Lopez Mateos dam, belonging to the Culiacan river basin, located between the municipalities of Badiraguato and Culiacan. This reservoir is considered a large dam because of its volume capacity of 3086 Mm³. Adolfo Lopez Mateos dam serves several purposes including electric power generation, fisheries, and agricultural irrigation supply (Zamudio, 2008).

2.2. Basic and thematic geographic information analysis

The data set used in this study was derived from two different sources; local cartography information and satellite images. Local cartography includes basic cartography and thematic information. This data was obtained through the web portal of the National Institute of Statistics and Geography (INEGI), with the support of the digital map of Mexico software (INEGI, 2015). Landsat satellite images were obtained from the US Geological Survey (USGS, 2015) website.

GIS software and utilities selection was based on the criterion that these tools were open source. Quantum GIS (QGIS) and Spring tools were selected for image analysis due to its useful, simple, and friendly interface, that allows processing the largest number of file formats, both input and output, and the exchange of information through the publication of cartography.

QGIS is an Open Source Geographic Information System (GIS) and part of an official project of Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). QGIS is executed from Linux, Unix, Mac OSX, Windows, and Android platforms. Due to its Graphical User Interphase (GUI), this software is easy to use and supports various formats and data functionality of vector type and raster data, supporting different types of databases as well. This software incorporates the Geospatial Data Abstraction Library (GDAL library) and handles a wide range of raster data, which allows the automation of batch cartographic processes (Quantum GIS, 2015). In this study, this tool was used for vector treatment and for georeferencing and upgrading the basic geographical information of land use and land cover.

In order to integrate the information in raster and vector mode under a unique environment, the Georeferenced Information Processing System (Spring) was used (INPE, 2015). Spring consists of 2 modules: Escarta e Impima. Escarta allows the preparation and printing of maps, and Impima manages the various file formats (Camara et al., 1996). This tool is adequate to process the satellites images, since it allows managing large amounts of image formats.

Digital treatment of the Landsat TM, ETM, and OLI images was carried out to distinguish and detect significant changes among the classes of land use and land cover that have occurred in the Culiacan river basin. Image treatment was divided into three phases: (a) preprocessing (Dataset), (b) processing (by supervised and unsupervised classification methods) and (c) post processing (validation of results). The process was carried out as shown above:

2.3. Pre-processing of the dataset

2.3.1. Local dataset

The georeferencing of the basic cartography set was carried out using the WGS84 reference system (World Geodetic System, 1984) and



Fig. 2. Physiography of study area.

UTM projection (Universal Transverse Mercator), area 13. A second-degree polynomial transformation model was used to correct the distortions and inaccuracies. This model fits the geometry of the image to a new geographical position. In this case, study area is formed by 26 topographic charts at scale 1:50,000. Therefore, six ground control points (GCP) were selected for each chart used in the intersections of the coordinate grid (one in each vertex of basic cartography and two in the middle). The establishment of GCP was carried out following the recommendation by Roset and Ramos (2012). A total of 156 GPC were used to generate a mosaic of the study area.

Once a mosaic was generated, thematic information (land use) was imported. This information was already georeferenced in WGS84 reference system, UTM projection zone 13. Preliminary analysis of vegetation thematic information, supported by visual recognition of images, generated the categories and thematic classes in the study area. Nine thematic classes were deducted: Urban area (ZU), Agricultural use (AG), Hydrology (HG), Tropical Deciduous Forest (SB), Pine-oak Forest (BE), Pine Forest (BP), Induced pasture (PI), Ayarin Forest (BA), and Oyamel fir Forest (BY). These classes were later used to validate the results obtained from the classification process.

2.3.2. Satellite image data

LANDSAT satellite images captured from the Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM) and Operational Land Imager (OLI) sensors were used. These images were taken between the months of April and June for each of the periods: 1990–2000 and 2000–2014, with a spatial resolution of 30 m (USGS, 2015).

LANDSAT images were selected based on the quality of the image. Images that presented a minimum percentage of negligible cloud cover and that did not present any defect caused by the sensor were selected. This selection was carried out with the purpose of a better exploitation of the information.

The multispectral image obtained in 1990 from the TM sensor consists of seven spectral bands, three of which operate in the visible range, one in the near infrared, two in the mid-infrared and the last one in the thermal infrared range. Each band is formed by 7841 columns and 7091 lines, with a spatial resolution of 30 m (pixel size), a temporal resolution of every 16 days and a radiometric resolution of 8 bits. The multispectral image obtained in 2000 from ETM sensor consists of eight spectral bands. The first seven bands are formed by 7911 columns and 7121 lines, in the same spatial, temporal, and radiometric resolution as the TM images. The panchromatic band (band 08) has 15,821 columns and 14,241 lines, with a spatial resolution of 15 m (USGS, 2015).

LDCM (Landsat Data Continuity Mission) images of the Landsat 8 satellite with the OLI and TIR (Thermal Infrared) sensors consist of nine spectral bands with a spatial resolution of 30 m for the bands from 1 to 7 and 9. Each band is formed by 7701 columns and 7861 lines. A new band (deep-blue band 8) is useful for coastal studies and aerosols. The resolution for this panchromatic band is 15 m, consisting of 15,401

columns and 15,721 lines. Bands 10 and 11 are thermal bands and are used for providing more precise temperatures of the surface with 100 m of resolution (USGS, 2015). The approximate size of the scene is 170 km from north to south, and 183 km from east to west. LDCM images present high-quality data due to its improved radiometric resolution of 16 bits. They have the same temporal resolution of every 16 days.

Despite Landsat images were geometrically corrected and calibrated since they were downloaded from USGS-NASA server, they were georeferenced from _MTL.txt file. This extension file is used for Landsat image with metadata. During rectification process, four control points were used for each image (upper left, upper right, lower left and lower right corners). Images were geometrically corrected and calibrated to WGS84 datum and UTM projection, zone 13. Visual quality of the images was improved through histogram contrast, where digital levels (DL) were set at ranges from 0 to 255. Despite visual quality of an image was not used during numerical analysis, this procedure was carried out to select training samples during classification process.

Adjustment functions of geometric correction process were used to calculate the correct position of each pixel. The geometric correction involved only a coordinate change, but not a digital level (DL) modification. These functions created a new array, correctly positioned and defined in the transformation process. Therefore, the thematic categories of each scene were separately classified and then compared with each other. According to this, an orthorectified image was not necessary.

Orthorectification process introduces mean values, which modifies the original value of the pixel. Therefore, the nearest neighbor algorithm was the best choice to correct a classified image, since this method preserves the original values (Chuvieco, 2007). Moreover, multi-temporal remote sensing studies require that the sensor system provide regular coverage in the same spectral bands, and with similar observation conditions (height, time, acquisition angle, among others). Under these conditions, the image orthorectification is not necessary.

In this study, atmospheric correction was not required due to the fact that the images of the study area were acquired in suitable weather conditions. The methodology used for the digital classification took into account the classified images individually, but no comparisons between images pixels were made. Using the combination of information from the spectral bands 6, 5 and 4 corresponding to RGB (Red, Green and Blue) respectively, different land uses and types of coverage in the study area were determined.

2.4. Image classification methods

2.4.1. Unsupervised method

The satellite images obtained from remote sensing constitute a particular type of data by which large volume of information is derived (Olaya, 2014). The operations for information extraction were performed in an automated mode, where different classification algo-

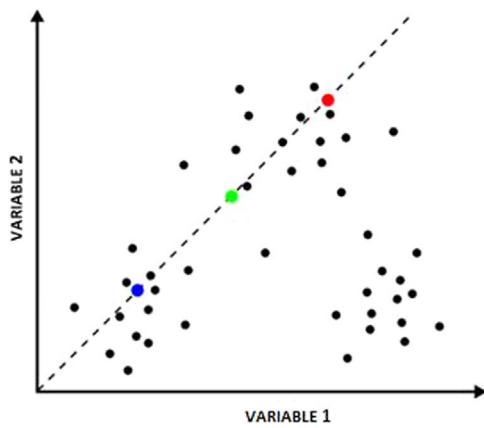


Fig. 3. Unsupervised classification method (adapted from Camara et al. (1996)).

rithms were used through SPRING software. Image classification is essentially a quantitative automated analysis, which incorporates statistical formulations based on the digital values of the different bands of the image. These values express the reflectivity (spectral signature) of each terrain feature.

Unsupervised classification method was initially used in order to locate and identify homogeneous areas (Camara et al., 1996; Conde et al., 2009). In this study, the classification algorithm ISOSEG was used, which allows classifying regions from a segmented image (Fig. 3). It is a non-supervised data clustering algorithm, applied on a set of regions which in turn are characterized by their statistical attributes (mean, covariance matrix and area). This unsupervised method is a clustering algorithm, thus, it does not require any prior information of the categories (Chuvieco, 2007). This algorithm groups regions from a measure of similarity between them. Therefore, this method is also known as cluster analysis (Eastman, 2003).

The segmentation technique generated regions as a set of contiguous pixels dispersed bidirectionally. In this process two input parameters were established: similarity and pixel area. Similarity determines the Euclidean distance between the single channel values of the both pixels. The pixel area corresponds to the minimum surface that a region may have. Two regions were considered different when the distance between their average values were higher than the similarity limit chosen. Since the elements of a cluster must be as similar as possible among themselves, and at the same time as different from the elements of other clusters as possible, the process is controlled by the parameter of similarity based on the distance (Riomoros, 2010). Then, small polygons were subsequently generated as representative samples and generated regions were used as a contour of each polygon.

2.4.2. Supervised method

The digital images classification for 1990–2000 and 2000–2014 was carried out through the supervised method, using the Bhattacharya classification algorithm. This algorithm estimates a density probability function from the values of the training samples obtained by the regions generated in the segmentation (Fig. 4). Then, the Bhattacharya distance of the classes is evaluated in each region. Having constructed the classes for images, they were compared to produce a dissimilarity measure.

Battacharya distance was used for comparing two functions, which represented probability distributions. Therefore, it represents the metric distance between two stochastic processes (Sanhouse-Garcia et al., 2015). The different sides of the parallels are defined by the mean of each variable in the class and its standard deviation (Lillesand et al., 2015). The length of the sides is equal to two times the standard deviation. This algorithm is represented by Eq. (1):

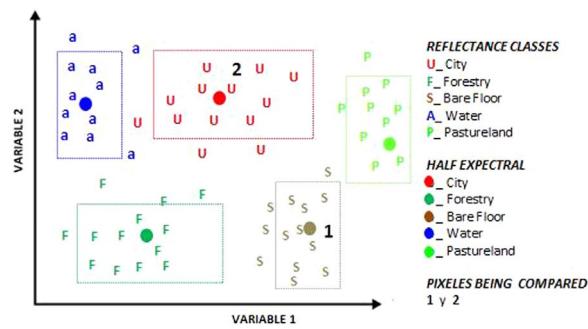


Fig. 4. Scheme of Bhattacharya supervised classification algorithm (adapted from Dos Santos et al. (2010)).

$$B(pi, pj) = \frac{1}{2}(m1 - m2)^t \sum (mi - mj) + \frac{1}{2} \ln \frac{|\sum (mi - mj)|}{|\sum i|^{\frac{1}{2}} |\sum j|^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

where: B is the Bhattacharya distance, Pi e Pj; are the pixels of the classes i e j; mi e mj; refers to the class average i e j; ln; is the natural logarithm and i and j; are the classes within the context.

In Bhattacharya distance classification process, it was necessary to establish training areas. A training area is the site that the classifier uses to be guided during the cover discrimination process. These zones were chosen with sufficient sizes for statistically characterizing the units they represent.

2.5. Multitemporal analysis method for change detection

Multitemporal analysis was carried out with the purpose of identifying the changes of land use and land cover that occurred between the periods 1990–2000 and 2000–2014 in the study area. This analysis was done by overlaying Landsat TM, ETM and OLI images previously classified by the supervised method. Open source software SPRING was used and the maps obtained in multitemporal analysis were expressed in a cross-tabulation array also known as transition matrix (Pontius et al., 2004). This matrix identified the most important transitions that occurred in a given period. From this matrix, a percentage of the areas for each category (land cover and land use) was identified. With this information, the covers that suffered significant transitions could be distinguished, and land use changes were identified.

The analysis of two pairs of components: net changes and exchanges, as well as gains and losses, separately determined the total change of the categories (Table 1). The annual change rate was also estimated according to the equation proposed by FAO (1996). This annual change rate represents the cover change in hectares and the percentage of the area at the beginning of each year. The array as well as the map evaluated the spatial dynamics occurring for the different covers present in the Culiacan river basin.

Areas that did not suffer any changes (stable areas) between time 1 (t_1) and time 2 (t_2) are presented in the main diagonal of the table (P_{jj}); the elements outside the main diagonal correspond to transitions occurred among categories. Total time, row 2 indicates the total area that deals with each class at time t_2 (P_{+n}). Gain (G_{ij}) column indicates the proportion of the landscape that experienced an increase between time 1 and time 2. Gain is computed as the difference between the total column of row 6 and the main diagonal according to Eq. (2) (Pontius et al., 2004).

$$G_{ij} = (P_{+j} - P_{jj}) \quad (2)$$

Total time column 1 represents the total area for each category at time t_1 (P_{+n}). The difference between Total time 1 and the values of the main diagonal represent the Loss (L_{ij}) that each category had between t_1 and t_2 , as shown in Eq. (3)

Table 1
Cross-tabulation matrix.

Time 1	Time 2				Total time 1	Loss
	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4		
Category 1	P₁₁	P₁₂	P₁₃	P₁₄	P₁₊	P_{1+ - P₁₁}
Category 2	P₂₁	P₂₂	P₂₃	P₂₄	P₂₊	P_{2+ - P₂₂}
Category 3	P₃₁	P₃₂	P₃₃	P₃₄	P₃₊	P_{3+ - P₃₃}
Category 4	P₄₁	P₄₂	P₄₃	P₄₄	P₄₊	P_{4+ - P₄₄}
Total time 2	P₊₁	P₊₂	P₊₃	P₊₄	1	
Gain	P ₊₁ - P ₁₁	P ₊₂ - P ₂₂	P ₊₃ - P ₃₃	P ₊₄ - P ₄₄		

Source: Pontius et al. (2004).

$$L_{ij} = (P_{i+} - P_{ii}) \quad (3)$$

where;

P_{ij}: denotes the landscape proportion that is experiencing a transition from the category i to category j, where the number of categories is defined by the researcher.

P_{i+}: is Total time 1 and denotes the proportion of the landscape in cover i at t₁.

P_j: is Total time 2 and denotes the proportion of the landscape in the cover j at t₂.

P_{jj}: is the stable zone and denotes the cover permanence at the end of a study period. This covered part showed no land use change.

Once gains and losses are calculated, the change occurred in the landscape for each cover during a study period is determined. Net change (NC) is obtained from the absolute value of the subtraction within the area of a same coverage, but at a different time, represented by Eq. (4).

$$NC = |P_{+j} - P_{+i}| \quad (4)$$

Using Eqs. (2) and (3), all the changes for each cover are determined. Total Change (TC) is the sum of the Gain and Loss (Eq. (5)).

$$TC = G_{ij} + L_{ij} \quad (5)$$

The transition area experienced for each cover may also be calculated. Exchange (S_j) is twice the minimum value of the G_{ij} or L_{ij} for each cover. Every gain unit for a cover represents the same amount of loss for another. This is represented in Eq. (6).

$$S_j = 2 * Min(G_{ij}, L_{ij}) \quad (6)$$

Finally, the annual change rate (r) is calculated for each study period and for each type cover. The equation suggested by FAO (1996) was applied to estimate this rate. This equation expresses the percentage of surface cover change (Eq. (7)):

$$r = \left[\frac{A_2}{A_1} \right]^{\frac{1}{n}} - 1 * 100\% \quad (7)$$

where:

A₁: is the surface area at the beginning of the period.

A₂: is the surface area at the end of the period.

N: is the study of time (t₂ - t₁).

The construction of this matrix represents the basis for obtaining information that starts from a general analysis to an approach of detailed changes in the territory. Consequently, the results based on comparisons between t₂ and t₁ describe transitions between all land uses that occurred in the study area.

2.6. Validation of results

The classification process accuracy was determined by the matrix of confusion or error matrix. The results of the supervised classification process were compared with the information of the local data set. The error matrix measures objectively and quantitatively the goodness of fit and the quality of the results obtained. This is achieved using the kappa index proposed by Congalton and Green (2009). This index is a statistic that refers to the degree of agreement that correct the random error among the observers (image classification) and the ground truth obtained from local data set (Lozada and Arnau, 2000). This index takes into account the pixels that have not been classified correctly outside the main diagonal (Lillesand et al., 2015). The kappa index calculation is based on Eq. (8).

$$\hat{\kappa} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad (8)$$

where: r; number of rows in the error matrix, x_{ii}; number of observation in row i and column i (on the major diagonal), x_{i+}; total of observation in row i (shown as marginal total to right of the matrix), x_{+i}; total of observation in column i (shown as marginal total at bottom of the matrix) and N; total number of observation included in matrix.

The error matrix can be used to determine the user and the map producer accuracy. The map producer accuracy is obtained by dividing the number of successes in the class by the total number of samples in a reference class (column). Map producer accuracy is an indicator of the omission errors. User accuracy is obtained by dividing the number of successes by the total number of samples in an obtained class (rows). User accuracy indicates the commission errors. This process is one of the widest and most commonly used validation method for image classification either using open source or privative tools (Chuvieco, 2007; Lillesand et al., 2015).

Validation using error matrix requires representative samples of the population to be assessed. In this study, the samples were determined using the multinomial distribution proposed by Congalton and Green (2009) (Eq. (9)). Small polygons were randomly selected and stratified as sampling unit. The classes were considered different amongst them (strata), but with great homogeneity respecting their use. The samples were determined from a chi-square distribution, using a confidence level of 95% and the percentage value of the image covered by each class.

$$\eta = \beta II_k(1 - II_k)/b_k^2 \quad (9)$$

where II_k is the fraction of the image surface corresponding to class k identified in the study area; β is a coefficient determined by means of a Chi-square distribution (X^2) ($\beta=768,909$), with a degree of freedom. Due that a confidence level of 95% was established, b represents the desired precision 5% ($b=0.05$) and k is the number of classes or categories (in this study, k=9 classes).

3. Results and discussion

The evaluation of the classification algorithm was carried out based on the error matrix, which considered the degree of concordance between the classified classes and the local data set (Ahmad, 2012). This matrix is the basis of quantitative measurements and summarizes the nature of assignments of categories created in the image classification. According to Foody (2002), the use of error matrix continues generating problems with the evaluation of the accuracy in the classification process, as rarely interpretation of its results appears to be subjective. This is because the present data mixed pixels or due that these results had errors when registering the reference data. Foody (2002) found these problems when tried to classify very large areas at regional or global scale (with spatial resolution of 1 km or more). Therefore, if the main objective is to evaluate the accuracy of large area maps, this author suggests the use of other methods and avoids generalizing the defined classes.

In this study, classification of local data set, using LANDSAT images with a spatial resolution of 30 m allowed the grouping of different classes with the non-supervised method. This method initially generated 30 different groups. This preliminary classification served as a statistical base for a greater degree of adjustment in the supervised classification. By associating these groups with thematic information of land used provided by INEGI, the 30 initial groups were reduced to 9 classes.

Image regions were considered as determinant criteria for final classification during training phase of Bhattacharya algorithm. A total sample size of 768 points was considered and the samples were identified to their corresponding class with a confidence level of 95%.

3.1. Image classification

Classification process using the Bhattacharya algorithm (parallelepipeds) in Spring (open source GIS), provided a high degree of separability and high values of kappa index. This situation resulted in a good concordance among the classified classes and the local data set. The overall accuracy of Landsat TM, ETM and OLI image classification were 89.2%, 88.05% and 86.45% in 1990, 2000 and 2014, respectively (Table 2).

The accuracy obtained in this study using original data set showed a good fit of kappa index, with values considered acceptable for this kind of studies and within the reported range for the development of land cover change detection studies (Amuti and Luo, 2014).

The statistical values of the kappa index obtained for each type of image were 0.86%, 0.86% and 0.85% for TM, ETM and OLI images, respectively. On the other hand, overall accuracy for all study period was higher than 85%, minimal overall accuracy value suggested by Araya and Cabral (2010) for an accurate and effective land cover change analysis.

3.2. Surface classification analysis

A preliminary analysis showed that the classification of tropical Deciduous Forest (SB), pine-oak Forest (BE) and pine Forest (BP) classes presented a dominant cover of 42.1%, 22.6% and 20.9%,

Table 2

Overall accuracy and kappa index.

Year	Classification results	
	Overall accuracy	kappa index
1990	89.20%	0.86%
2000	88.05%	0.86%
2014	86.45%	0.85%

Prepared by authors

respectively. Agricultural use (AG) and Induced pasture (PI) showed a mean dominant cover of 7.43% and 2.6% (Table 3).

Approximately 18% of the total area could not be classified in the thematic classes. According to Olaya (2014), it is common that elements cannot be classified due that they do not fall into any parallelepiped feature of the classifier. Likewise, certain elements could be overlapped between each other or the elements could also belong simultaneously to several classes. When the error matrix is used as a starting point for identifying possible error sources, human interpretation must be checked because they usually have a significant impact when considering a thematic class as correct or not.

This analysis showed that the classes that have reduced their cover were the Ayarin Forest (BA) and Oyamel Fir Forest (BO), followed by the Tropical Deciduous Forest (SB) and the Induced pasture (PI). However, Pine Forest (BP) class increased and maintained its surface density. This situation is due to the location of this class, which is toward the highest elevation zones, in areas of high slopes. However, the presence of a fire was observed in this class during the image processing in 2000.

Image analysis observed a change in the Agricultural use (AG) class (Fig. 5). In particular, a cover increase was registered and related to agricultural activities. This situation was evaluated through the visualization of the agricultural class with improved images. In this procedure, it was necessary to use a preliminary analysis of thematic mapping obtained by INEGI (2015). This mapping was carried out through field sampling and used as supporting information to validate the results. The results demonstrated that the modernization and industrialization of agriculture, and the increase of livestock products demand were the main reasons of agricultural use (AG) class increase. Similarly, this analysis evidenced the considerable increase of urban sprawl in the last 24 years.

3.3. Land use and land cover change analysis

From the separately image analysis, land use and land cover dynamics of Culiacan river basin was described for a period of 24 years. Change detection was based on multitemporal analysis using post-classification image comparison methodology, where the same thematic classes in the overlaid map were evaluated for each period. By means of transition array, this technique recognized categories that experienced changes for two periods: an initial period of 10 years (1990–2000) and a second period of 14 years (2000–2014) (Tables 4 and 5). The overlapping analysis describes the spatial distribution and change attributes in land cover during the different periods of study, represented by gains and losses of areas in each class.

On the other hand, in order to determine the annual change rate, Eq. (7) was applied in both periods, defined as Area 1 (A1), the initial year of the period and Area 2 (A2), as the last year of the period.

Cross-tabulation matrix in both periods showed areas where no spatially changes occurred between pairs of classes (stable areas) in its main diagonal. The values outside the main diagonal indicate the covers that experienced some type of change and the direction of this change (transition between classes). This matrix quantifies the area that it is maintained in its same spatial position throughout time. This array represents the most used procedure in studies of detection of land use changes (Pontius et al., 2004). By overlapping maps obtained in classification process, the spatial dynamics occurred in different covers of the Culiacan river basin. They were evaluated quantitatively and qualitatively for each study period (Table 5). The area occupied by each of the categories, as well as the area that showed low variation or almost a stable behavior was identified. The main diagonal analysis was also needed to identify dominant and systematic patterns in the land cover change analysis.

3.3.1. Analysis during 1990–2000

Individual analysis of land cover changes for the stable data (main

Table 3

Surface area classification.

Class	Year 1990		Year 2000		Year 2014	
	Area (ha)	Area (%)	Area (ha)	Area (%)	Area (ha)	Area (%)
ZU	397.89	0.04	3531.45	0.35	3624.4	0.36
AG	28,742.51	2.87	75,659.17	7.55	81,819.9	8.16
HG	10,660.85	1.06	2,820.25	0.28	6,892.02	0.69
SB	390,445.87	38.94	326,971.15	32.61	341,360.1	34.04
BE	148,792.57	14.84	208,603.03	20.80	206,801.9	20.62
BP	143,832.08	14.34	194,825.22	19.43	186,350	18.58
PI	53,579.32	5.34	9,485.55	0.95	1,221.9	0.12
BA	46,112.34	4.60	6,829.26	0.68	555.03	0.06
BO	6,398.19	0.64	236.39	0.02	336.7	0.03

Details of classified classes (ha)						
Classes	1990	%	2000	%	2014	%
Classified Area	828,961.62	82.67	828,961.47	82.7	828,961.9	82.7
Area not classified	173,787.70	17.33	173,787.89	17.33	173,787.46	17.33
Total Area	1,002,749.36	100	1,002,749.36	100	1,002,749.36	100

Prepared by authors

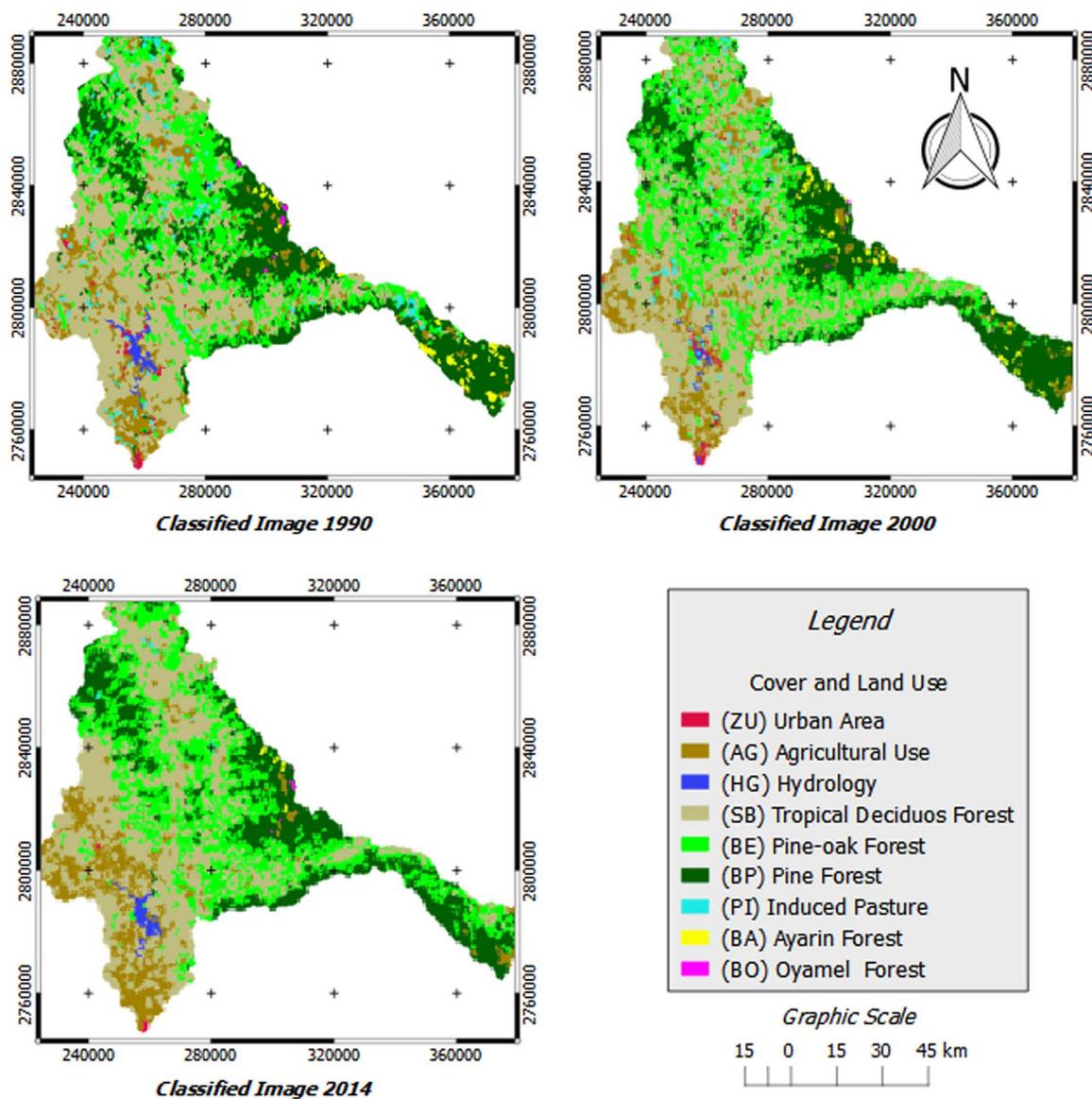
**Fig. 5.** Images of 1990, 2000 and 2014 after classification process.

Table 4

Cross-tabulation matrix between 1990 y 2000.

Class	Year 2000. Area in hectares (tf)									Total Area (1990)	Loss	
	ZU	AG	HG	SB	BE	BP	PI	BA	BO			
Year 1990 Area in hectares (ti)	ZU	221.13	165.24	0.00	11.52	0.00	0.00	0.00	0.00	397.89	176.76	
	AG	1,235.97	16,021.01	21.24	6,662.34	1,620.63	1,863.18	1,294.47	23.67	28,742.51	12,721.50	
	HG	862.59	3,399.61	2,578.60	904.77	876.60	1,645.29	393.39	0.00	10,660.85	8,082.25	
	SB	1,117.59	47,931.4	211.14	235,167.90	91,042.38	8,833.59	6,115.59	26.28	0.00	390,445.87	155,277.97
	BE	15.21	1,620.22	0.00	49,087.26	59,077.21	38,192.13	600.75	199.54	0.25	148,792.57	89,715.36
	BP	0.45	1,418.99	0.00	19,479.15	35,362.98	84,341.92	81.54	3,004.02	143.03	143,832.08	59,490.16
	PI	78.66	2,595.16	9.27	15,172.57	19,911.06	14,524.11	999.81	195.57	93.11	53,579.32	52,579.51
	BA	0.00	2,153.22	0.00	0.00	239.13	40,551.23	0.00	3,168.76	0.00	46,112.34	42,943.58
	BO	0.00	354.32	0.00	485.64	473.04	4,873.77	0.00	211.42	0.00	6,398.19	6,398.19
Total Area (2000)		3,531.60	75,659.17	2,820.25	326,971.15	208,603.03	194,825.22	9,485.55	6,829.26	236.39	828,961.62	
Gain		3,310.47	59,638.16	241.65	91,803.25	149,525.82	110,483.30	8,485.74	3,660.50	236.39		

Prepared by authors

diagonal) using transition matrix for 1990–2000 (**Table 4**) could lead to erroneous conclusions about the dynamics of the territory, due to the changes detected in this area could be higher than real changes. Despite land cover changes were observed, little variation for Tropical Deciduous Forest (SB) was registered and it maintained part of its initial surface area (235,167 ha) with dominant cover, equivalent to 60% of the total area for this class in 1990.

Pine Forest (BP) class also showed a good persistence, with a value of 84,341 ha, equivalent to 59% of the initial surface area (**Table 5**). However, commonly no cover changes are observed or little land cover variations prevail in most landscapes of the environment (**Pontius et al., 2004**). Therefore, this analysis should be complemented with an analysis of the changes identified outside the main diagonal. This supplementary analysis was used to identify dominant and systematic patterns present in the analysis of changes. From this point of view, Culiacan river basin presented strong transitions among classes (gains and losses) and therefore it was demonstrated that the study area presented a highly significant land cover dynamic.

Net change analysis was the starting point for identifying land use change signals. This analysis showed that the urban area (ZU) experienced an increase of 3310 ha equivalent to more than 500% of the surface area that this class had in 1990, with an apparent area loss of 176.76 ha. This loss could be associated to confusion present with agricultural use (AG) class. In 1990, the loss area identified in this study was declared as the urban area (ZU), but in that time there was little infrastructure and this area represented bare soil. This situation could explain the increase of 46,916 ha in the Agricultural Zone (AG) class, which represented a 163% of change. Other changes were identified in Pine-oak Forest (BE) and Pine Forest (BP) with 40% and 35%, respectively, taking into consideration the initial area observed in 1990.

The induced pasture (PI) loss represented a 44,093 ha, equivalent

to 82% of its initial extension. This situation was also observed for Ayarin Forest (BA) and the Oyamel Forest (BO). These covers showed significant losses of 39,283 and 6161 ha in their surface areas, which represented a loss of 85% and 96% of the original territory. On the other hand, the water bodies (Hg) class showed a decrease of 73% of the original surface area. This situation is critical because of the importance of the agricultural activities in the study area (**Fig. 6**).

Despite that the values obtained from the net change analysis gave an approximation to the interpretation of the land changes that have occurred in the study area, this analysis was not enough to give a clear picture on the territorial dynamics. The exchange areas produced between covers were not captured, nor the total change that occurred in the study period.

Through net change analysis, it was feasible to know the surface area change with respect to the original area. However, it was not possible to know if that coverage presented spatial modifications when interacting with others. To illustrate the aforementioned, the example of Tropical Deciduous Forest (SB) and Pine Forest (BP) classes were chosen. Total change (real) for Tropical Deciduous Forest (SB) is greater than net change. This situation can be explained because the total change was calculated as the sum of gains and losses, while net change was computed by the difference of the surface area between 1990 and 2000.

Therefore, spatial transitions for net change were unknown. For Tropical Deciduous Forest (SB) class, the total change was greater than net change even though the two classes that were compared almost had equal surfaces on each date. The exchange with other classes and the gain and loss areas determined its spatial variation.

As a consequence, this class showed the most changes on the territory with an exchange area of 183,606 ha compared to 1990, followed by the Pine-oak Forest (BE) class with 179,430 ha and the Agricultural use (AG) class with 25,443 ha. Net change showed a great

Table 5

Transition values between categories during 1990–2000.

Class	Period (year)	Identification of changes (ha)							Net change	Total change
		1990	2000	Stable area	Gain area	Loss area	Exchange area	Net change		
ZU	397.9	3,531.45	221.1	3,310.47	176.76	353.5		3,133.7	3,487.2	
AG	28,742.51	75,659.17	16,021.01	59,638.16	12,721.5	25,443.0		46,916.7	72,359.7	
HG	10,660.85	2,820.25	2,578.6	241.65	8,082.25	483.3		-7,840.6	8,323.9	
SB	390,445.87	326,971.15	235,167.9	91,803.25	155,277.9	183,606.5		-63,474.7	247,081.2	
BE	148,792.57	208,603.03	59,077.21	149,525.82	89,715.36	179,430.7		59,810.5	239,241.2	
BP	143,832.08	194,825.22	84,341.92	110,483.3	59,490.16	118,980.3		50,993.1	169,973.5	
PI	53,579.32	9,485.55	999.8	8,485.74	52,579.51	16,971.5		-44,093.8	61,065.3	
BA	46,112.34	6,829.26	3,168.76	3,660.5	42,943.58	7,321.0		-39,283.1	46,604.1	
BO	6,398.19	236.39	0.0	236.39	6,398.19	472.8		-6,161.8	6,634.6	

Prepared by authors

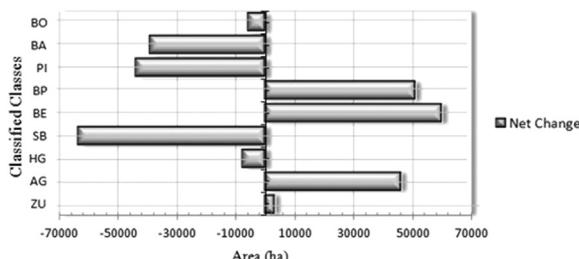


Fig. 6. Net change for 1990–2000 (prepared by authors).

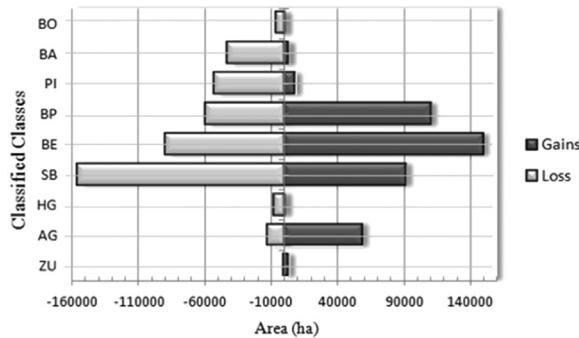


Fig. 7. Gains and losses for 1990–2000 (prepared by authors).

exchange of Pine Forest (BP) class to the other classes. This exchange was near 118,980 ha. Finally, Oyamel Forest (BO) and Urban Area (ZU) classes registered the lower exchange activity with other classes (Fig. 7).

3.3.2. Analysis during 2000–2014

The detected changes in the period 2000–2014 are shown in cross-tabulation analysis (Table 6). In this table, it is noted that a great terrestrial dynamism occurred for determined classes. The most stable class was Hydrology (HG), which kept its surface area of 2820 ha.

almost unchanged. Pine Forest class (BP) also maintained unchanged its surface area of 138,594 ha, which represent 71% of the total area of this class in this period.

Net change analysis for 2000–2014 (Table 7) showed an initial approach of the possible modifications that underwent the Urban area (ZU), with an increase of 2.6% compared to 2000. These results imply that the population in the study area was maintained with a minimum variation of 92.9 ha (net change) in this study period. However, that class reported an irregular behavior in the second study period (2000–2014) given that it experienced a high transition (exchange). By definition, the exchange value represents twice the estimated minimum value of the class loss. This exchange value is considered only in cases

where global statistics area occupied, but without showing the persistence (FAO, 2006). In such cases, it is difficult to determine gains, losses or exchanges accurately because of the kind of occupation given. Hence, the high transition observed could be related to an error in the classification process, in particular during the selection of training samples by the interpreter.

Tropical Deciduous Forest (SB) also showed a slight transition of 4.4%, equivalent to an increase of 14,388 ha. In this case, the classifier confused part of this class as belonging to Pine-oak Forest (BE). This was demonstrated because a surface area loss of Pine-oak Forest (BE) was reported towards the border of Tropical Deciduous Forest (SB) class. Agricultural Area (AG) suffered a minimum increase of 6,160 ha, which represents only an increase of 8%. In general, the aforementioned classes presented much less variation than the observed in previous period (1990–2000).

On the other hand, Pine-oak Forest (BE) and Pine Forest (BP) classes lost near of 1810 ha and 8475 ha of surface area, equivalent to 1% and 5% of the total initial area for each class, respectively. Ayarin Forest (BA) class also diminished its surface area approximately 91% (6274 ha) of the total surface observed in 2000 (Fig. 8). In the case of Oyamel Forest (BO), this class showed an increase of 42.5% in its surface area, which represents 100.3 ha.

This increase could be related to the location of this class, which is found in steep zones. From an ecological perspective, the territory dynamics shown by Ayarin, Oyamel, and Pine forest covers were evident in both periods. This situation could be related to the high population dynamics registered by INEGI (2015b). Surface area loss observed in these classes related to the population increase could also lead to a loss of biodiversity in the Culiacan river basin. Therefore, land use and land cover changes detected in this study represent an important warning about the conservation status of the Culiacan river basin. Biodiversity loss in this geographic location could put food security at risk and could affect the required standards of water quantity and quality (SCDB, 2010; Ortiz, 2012).

These results agreed with the results obtained in the previous period (1990–2000), where Induced pasture (PI), Ayarin and Oyamel Forest classes drastically diminished its surface area. Other classes that also reduced their surface area were Tropical Deciduous Forest (SB) and Pine Forest (BP) classes, both with moderate activity of exchange (Fig. 9).

3.4. Annual change rate

The parameters used to measure the change in land covers and land uses were similar during the different periods evaluated. The most consistent statistics of land use and land cover change analysis correspond to the vegetation. On the other hand, the least reliable analysis was for water bodies (HG) class, because of the observed small

Table 6

Cross-tabulation matrix between 2000 and 2014.

Class	Year 2014. Area in hectares (t_4)									Total Area (2000)	Loss
	ZU	AG	HG	SB	BE	BP	PI	BA	BO		
Year 2000 hectares (t_1)	ZU 688.86	1,708.74	775.08	292.23	57.42	9.22	0.00	0.00	0.00	3,531.55	2,842.74
	AG 1365.45	35,367.39	2,758.68	27,328.23	5,323.86	3,155.94	359.64	0.00	0.00	75,659.19	40,291.80
	HG 0.09	159.39	2,435.13	70.20	14.04	141.48	0.00	0.00	0.00	2,820.33	385.2
	SB 1570.02	33,421.23	610.20	220,817.97	62,884.98	7,551.98	114.84	0.00	0.00	326,971.22	106,153.3
	BE 0.00	5,626.53	1.26	79,924.68	92,588.22	30,236.65	225.72	0.00	0.00	208,603.06	116,014.8
	BP 0.00	3,212.10	0.00	9,963.81	42,216.39	138,594.05	44.64	554.58	239.67	194,825.24	56,231.19
	PI 0.00	2,215.44	311.67	2,962.44	3,369.96	148.95	477.09	0.00	0.00	9,485.55	9,008.46
	BA 0.00	109.08	0.00	0.54	347.04	6,326.00	0.00	0.45	46.35	6,829.46	6,829.02
	BO 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	185.72	0.00	0.00	50.67	236.39	185.67
Total Area (2014)	3,624.42	81,819.90	6,892.02	341,360.10	206,801.91	186,350.0	1,221.93	555.03	336.69	828,961.95	
Gain	2,935.56	46,452.51	4,456.89	120,542.13	114,213.69	47,755.94	744.84	554.58	286.02		

Table 7

Transition values among categories during 2000–2014.

Class	Period (year)		Identification of changes (ha)					
	2000	2014	Stable	Gains	Loss	Exchange	Net Change	Total Change
ZU	3,531.5	3,624.4	688.9	2,935.6	2,842.7	5,685.5	92.9	5,778.3
AG	75,659.2	81,819.9	35,367.4	46,452.5	40,291.8	80,583.6	6,160.7	86,744.3
HG	2,820.3	6,892.0	2,435.1	4,456.9	385.2	770.4	4,071.7	4,842.1
SB	326,971.2	341,360.1	220,818.0	120,542.1	106,153.3	212,306.5	14,388.9	226,695.4
BE	208,603.0	206,801.9	92,588.2	114,213.7	116,014.8	228,427.4	-1,801.1	230,228.5
BP	194,825.2	186,350.0	138,594.1	47,755.9	56,231.2	95,511.8	-8,475.3	103,986.7
PI	9,485.6	1,221.9	477.1	744.8	9,008.5	1,489.7	-8,263.6	9,753.3
BA	6,829.3	555.0	0.5	554.6	6,829.0	1,109.2	-6,274.4	7,383.6
BO	236.4	336.7	50.7	286.0	185.7	371.4	100.3	471.7

Prepared by authors

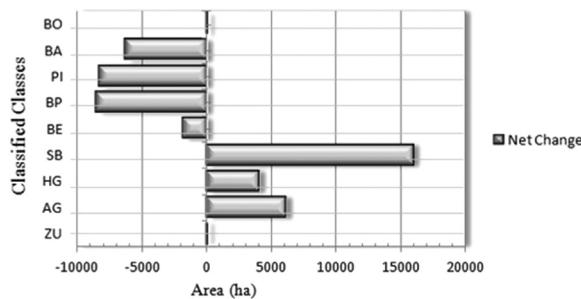


Fig. 8. Net change for 2000–2014 (prepared by authors).

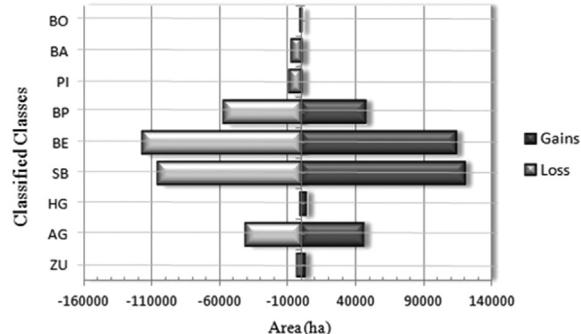


Fig. 9. Gains and losses for 2000–2014 (prepared by authors).

inaccuracies in the transition zones of this class.

The annual rate change difference between t_1-t_2 (1990–2000) and t_2-t_3 (2000–2014) evidenced significant changes in land cover and land uses, taking into account the ecosystems' own dynamics. The changes observed during 1990–2000 may be considered relevant because of the difference of surface modified in this period (Table 8). An increase of

the agricultural class was distinguished, with an annual change rate of 10.12%. The urban area experienced an increase of 24.4%.

On the other hand, surface loss analysis for forest classes (both Oyamel Forest [BO] and Ayarin Forest [BA] classes) observed a deforestation rate of 22.7%, which represents 4,500 ha per year. The annual rate change observed percentages that were higher than the mean deforestation rate for Mexico (-0.25% and -1.02%) reported by Velázquez et al. (2002) and (-0.76%) by Mas et al. (2009), which it is an indicator of the strong pressure of the surrounding population.

During 2000–2014, a surface area loss was observed for Pine-oak Forest (BE), Pine Forest (BP), Induced Pasture (PI) and Ayarin Forest (BA) classes (Table 9). Induced Pasture (PI) class showed an annual change of -13.62%, representing a loss of 590 ha per year (net change/year). Due that this image was captured during the dry season, this class could be confused with the agricultural use (AG) class and the annual change value of Induced Pasture (PI) could be affected. Despite that an annual change of 16.4% was registered for Ayarin Forest, this loss was registered because Ayarin Forest (BA) was classified as Pine Forest (BP) (Table 6).

On the other hand, the Urban Area (ZU) showed an annual change of 0.19%, representing a slight increase in its surface area. This situation is due to the fact that urban sprawl grew out of the established as urban area. An example of this type of growth is small human settlements located around urban areas. According to the results obtained, a strong intervention of human action in the Culiacan river basin was confirmed, resulting in an increase of the deforestation rate for three forest types. However, Oyamel Forest (BO) class presented an increase of 2.6% in its exchange rate, which means that this class recovered part of its extension previously observed in 1990.

However, slight modifications were found in Agricultural (AG), Tropical Deciduous Forest (SB), and Ayarin Forest (BA) classes. These covers showed an area increase much smaller than the previous period and the changes observed were minimal. The Oyamel Forest (BO) class showed a slight increase in its surface extension of 2.6%. This value

Table 8

Annual rate of change (1990–2000) in hectares.

Class	Period		Net change	Year	Exchange rate (r)	Rate (%)
	Área (1990)	Área (2000)				
ZU	397.9	3,531.5	3,133.71	10	0.243996	24.40
AG	28,742.5	75,659.2	46,916.66	10	0.101625	10.16
HG	10,660.9	2,820.3	-7,840.6	10	-0.124513	-12.45
SB	390,445.9	326,971.2	-63,474.72	10	-0.017585	-1.76
BE	148,792.6	208,603.0	59,810.46	10	0.034365	3.44
BP	143,832.1	194,825.2	50,993.14	10	0.030811	3.08
PI	53,579.3	9,485.6	-44,093.77	10	-0.158980	-15.90
BA	46,112.3	6,829.3	-39,283.08	10	-0.173856	-17.39
BO	6,398.2	236.4	-6,161.80	10	-0.280953	-28.10

Prepared by authors.

Table 9

Annual rate of change (2000–2014) in hectares.

Class	Period		Net change	Year	Exchange rate (r)	Rate (%)
	Area (2000)	Area (2014)				
ZU	3,531.5	3,624.4	92.82	14	0.001855	0.19
AG	75,659.2	81,819.9	6,160.71	14	0.005607	0.56
HG	2,820.3	6,892.0	4,071.96	14	0.065910	6.59
SB	326,971.2	341,360.1	14,388.96	14	0.003081	0.31
BE	208,603.0	206,801.9	-1,801.08	14	-0.000619	-0.06
BP	194,825.2	186,350.0	-8,475.66	14	-0.003172	-0.32
PI	9,485.6	1,221.9	-8,263.62	14	-0.136172	-13.62
BA	6,829.3	555.0	-6,274.44	14	-0.164132	-16.41
BO	236.4	336.7	100.35	14	0.025600	2.56

Prepared by authors.

means that the class recovered some of its extension in this period.

4. Conclusions

Remote sensing offers great possibilities for knowledge development of environment, but nowadays efforts to improve spatial, spectral, and temporal resolution of the data continue. Numerous studies have been carried out in order to analyze land use and land cover changes with greater scientific rigor, trying to draw definitive conclusions about environmental processes.

Remote sensing data role is to highlight the key parameters of environmental models and interpretation techniques, and to study its variability both spatially and temporally. Some of these models require some type of software to manage data set. In this point, open source QGIS and Spring tools have demonstrated their potential in digital image processing.

A combined methodology was applied in this work for land use and land cover change analysis, which consisted in a previous classification of images separately and then an analysis of surface area gains, losses and exchanges and their intensity on two levels (category and transitions) for two different periods: ten years (1990–2000) and fourteen years (2000–2014). The results obtained in this study provided a significant tool for a better understanding of the spatiotemporal land cover dynamics in the Culiacan river basin.

Periods analyzed using the transition matrix showed the direct influence of human activities on natural covers (coniferous forest, deciduous forest, induced pasture), which drastically reduced their surface area. This situation resulted that other land use classes extended their border, increasing considerably its surface (ie. agricultural use and urban area), which represented a significant change in the biophysical landscape, especially in the period 1990–2000.

In the period 1990–2000, 52% of the total surface was modified and 48% remained unchanged (stable). This situation led to an annual change rate of 34%, equivalent to 3200 ha lost per year. In the period 2000–2014, Total surface area changed only 41%, lower than the observed in the past period analyzed. This situation resulted in an annual change of 20%, with a loss of 253 ha per year. Therefore, the results showed the first 10-year period frequent and severe anthropogenic interventions were observed in the environment, while the 14-year period analysis showed that these interventions occurred gradually.

The analysis using satellite images is an important tool to monitor changes in land use and land cover throughout time and space, giving an objective view to the territory dynamics and increasing the confidence of decision makers to help formulate effective sustainable projects to conserve natural resources. In particular, this tool could also be used to know water refill time of its main water body (Adolfo Lopez Mateos dam). This reservoir is used for all irrigation activities located in this basin. Therefore, satellite image analysis could also help to design water resource management programs at local or regional

scales.

However, in order to obtain more accurate results, a validation of the classification results with primary data is suggested. This primary data could be data obtained by viewing field, as well as direct measurements covers obtained from high accuracy spectroradiometer.

More studies are necessary to investigate explanatory factors by which such changes are originated. Single or multi-level statistical analysis methodologies should be used to find factors influencing the transitions processes. In addition, this study used only the red, green and blue bands of the images for classification purposes. To improve the classification accuracy, it could be consider adding the near infrared band (NIR), which could help distinguish better the types of vegetation in the study area. Furthermore, a study for both rainy and dry season is also recommended in order to have a more complete statistical analysis, with pairs of maps and data classes.

Acknowledgement

The authors recognize the contribution of National Institute of Statistics and Geography (INEGI) and National Commission of Water (CONAGUA) for the availability of the database to support the realization of this work. The authors also acknowledge to National Council of Science and Technology in Mexico (CONACYT) for supporting this research work in the call for 2014 Young Researcher Grants (Cátedras para Jóvenes Investigadores 2014- Ref. 2572).

Appendix A. Supplementary material

Supplementary data associated with this article can be found in the online version at <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.002>.

References

- Ahmad, A., 2012. Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Appl. Math. Sci.* 6 (129), 6425–6436.
- Aldwaili, S.Z., Pontius, R.G., Jr., 2012. Intensity analysis to unify measurements of size and stationary of land changes by interval, category, and transition. *Landscape Urban Plan.* 106, 103–114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.010>.
- Amuti, T., Luo, G., 2014. Analysis of land cover change and its driving forces in a desert oasis landscape of Xinjiang, northwest China. *Solid Earth* 5, 1071–1085. <http://dx.doi.org/10.5194/se-5-1071-2014>.
- Araya, Y., Cabral, P., 2010. Analysis and modeling of urban land cover change in Setúbal and Sesimbra, Portugal. *Remote Sens.* 2, 1549–1563. <http://dx.doi.org/10.3390/rs2061549>.
- Bocco, G., Mendoza, M., Masera, O., 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investig. Geogr.* 44, 18–38.
- Camara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Comput. Graph.* 20 (3), 395–403. [http://dx.doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](http://dx.doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8).
- Chuvieco, E., 2007. *Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio* Third ed.. Ariel, Barcelona.
- CONAFOR, 2010. Estudio regional forestal. Unión de Ejidos Forestales Centro Sinaloa – SEMARNAT, Culiacan.
- Conde, M., Perelman, S., Cerezo, A., 2009. Efecto de diferentes métodos de clasificación

- de imágenes satelitales sobre índices de paisaje. Rev. Teledetec. 32, 5–13.
- Congalton, R., Green, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices Second ed.. CRC Press, Florida.
- Corrales, G., Plata, W., Hinojosa, G., Aguilar, J., 2014. Análisis de los cambios de uso y cobertura del suelo para el Estado de Sinaloa mediante Sistemas de Información Geográfica. XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Alicante.
- Dos Santos, A., Oliveira, T., Suemi, N., 2010. Spring, Aplicaciones Prácticas. Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidad Federal do Espírito Santo (UFES). Brasil.
- Eastman, J., 2003. IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs Clark University, Worcester.
- FAO, 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO, Rome.
- FAO, 2006. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005. Hacia la ordenación forestal sostenible. Documento de trabajo No. 147 (Montes). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. (<http://www.fao.org/forestry/site/2620/en/page.jsp>) (accessed 03.10.16.)
- Foody, G.M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sens. Environ. 80, 185–201. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4).
- González, D., 2013. Enciclopedia de los municipios y delegaciones en México. (<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM25sinaloa/index.html>) (accessed 04.01.16.).
- INEGI, 2010. Compendio de información geográfica municipal. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Badiraguato.
- INEGI, 2015a. Mapa digital de México. Available: (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/mapadigital/>) (accessed 04.01.16.).
- INEGI, 2015b. VII, VIII, IX, X, XI y XII Censos Generales de Población y Vivienda, 1980, 1990, 2000, 2005 y 2010. (<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccep/>) (accessed 25.09.16.).
- INPE, 2015. Image catalog of remote sensing. (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) (accessed 04.01.16.).
- Kiptala, J., Mohamed, M., Mul, M., Cheema, M., Van der Zaag, P., 2013. Land Use And Land Cover Classification Using Phenological Variability From MODIS Vegetation In The Upper Pangi River Basin, Eastern Africa. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 66, 112–122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2013.08.002>.
- Lillesand, T., Kiefer, R., Chipman, J., 2015. Remote Sensing and Image Interpretation. Wiley, Hoboken.
- Loya-Carrillo, J.O. Aguilar-Estrada, S.A. Bravo-Peña, L.C. Sánchez-Flores, E., 2013. Evaluación espacio-temporal del impacto del crecimiento urbano sobre la cobertura vegetal en la región fronteriza Nogales, México y Arizona, Estados Unidos, durante el periodo 1995–2010. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 9(1), pp. 124–140.
- Lozada, J., Arnau, J., 2000. Fiabilidad entre observadores con datos categóricos mediante el Anova. Psicothema 12 (2), 335–339.
- Mas, J-F., Velázquez, A., Couturier, S., 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. Investigación ambiental ciencia y política pública, p. 1(1), 23–39.
- Meyer, W., Turner, B., 1994. Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective. Cambridge University Press, New York.
- Olaya, V., 2014. Sistemas de Información Geográfica. Bubok, Madrid.
- Ortiz, R., 2012. El cambio climático y la producción agrícola. Unidad de salvaguardias ambientales (VPS/ESG). Banco interamericano de desarrollo (BID), Washington.
- Osuna-Osuna, A.K., Díaz-Torres, J.J., De Anda-Sánchez, J., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J., Dávila-Vázquez, G., 2015. Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994–2010. Rev. Ambient. Agua 10 (2), 350–362. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1539>.
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M., Plata, W., 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariante. Una aproximación a los procesos de deforestación. Investig. Geogr. 69, 33–52.
- Pontius, R.G., Jr., Shusas, E., McEachern, M., 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. Agric. Ecosyst. Environ. 101, 251–268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>.
- Quantum GIS, 2015. Quantum GIS Geographic Information System. India: Free Software Foundation, Available online (<http://www.qgis.org/es/site/>) (accessed 04.01.16.).
- Riomoros, M., 2010. Segmentación Automática de Texturas en Imágenes Agrícolas. Proyecto Fin de Máster en Sistemas Inteligentes. Universidad Complutense de Madrid Facultad de Informática. (<http://eprints.ucm.es/11325/>) (accessed 24.07.16.).
- Rodríguez-Galiano, V., Chica-Olmo, M., 2012. Land cover change analysis of a mediterranean area in Spain using different sources of data: Multi-seasonal Landsat images, land surface temperature, digital terrain models and texture. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform. 35, 208–218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.06.014>.
- Roset, R., Ramos, N., 2012. Georreferenciación de mapas antiguos con herramientas de código abierto. Rev. Catalana Geogr. 146, 16–30.
- Ruiz, V., Savé, R., Herrera, A.H., 2013. Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflores Moroponte Nicaragua, 1993 – 2011. Ecosistemas 22 (3), 117–123. <http://dx.doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.16>.
- Sanhouse-Garcia, A.J., Rangel-Peraza, J.G., Bustos-Terrones, Y., García-Ferrer, A., Mesas-Carrascosa, F.J., 2015. Land use mapping from CBERS-2 images with open source tools by applying different classification algorithms. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.12.004>.
- SCDB, 2010. Agua potable, Diversidad biológica y Desarrollo: guía de prácticas recomendadas. Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, Montreal.
- SEPU, 2014. Plan Municipal de Desarrollo Badiraguato 2014. Sistema Estatal de Planeación Urbana, Badiraguato.
- SER, 2004. Natural Capital and Ecological Restoration, An Occasional Paper of the SER Science and Policy Working Group. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, Washington.
- USGS, 2015. Landsat mission news. Landsat update 9 (5), 1–7.
- Velázquez, A., Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Sucedo, R., Alcántara, P.C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., Palacio, J.L., 2002. Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México. Gaceta Ecológica 62, 21–37.
- WBG, 2014. Agricultura clímaticamente inteligente en Sinaloa, México. Serie de perfiles nacionales de agricultura clímaticamente inteligente para América Latina. Grupo del Banco Mundial-CLAT-CATIE, Washington.
- Zamudio, R., 2008. Historia del Desarrollo Hidroconómico de Sinaloa (1947–1970). El Caso de la Presa Humaya y la Unidad IV del Distrito de Riego 10. Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán.