

**Análisis Espacio-Temporal de la Incidencia Antrópica en la Cuenca del
Rio Cauca, en el Departamento Del Valle**

Claudia Alexandra Forero Bernal & Paola Andrea Zabala Parra.

Enero 2016.

Universidad Católica de Manizales.

Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Maestría en Teledetección

Parra. Todos los derechos reservados.

Dedicamos ese trabajo a nuestra familia, amigos y todos aquellos que hicieron posible la realización de este documento con sus acertadas orientaciones.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Agradecimientos

iv

Primeramente, nos gustaría agradecer a ti Dios por bendecirnos para llegar hasta donde hemos llegado.

A la Universidad Católica de Manizales la oportunidad de estudiar en su campus y ser pioneras en el área de la teledetección en Colombia.

A nuestro director de tesis, Dr. Alberto Boada por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado que podamos terminar nuestros estudios con éxito.

También nos gustaría agradecer a nuestros profesores de maestría porque todos han aportado con un granito de arena a nuestra formación.

A nuestros padres, por habernos proporcionado la mejor educación y lecciones de vida.

A nuestros compañeros de clase, con los que hemos compartido grandes momentos.

A todos nuestros familiares, por estar siempre a nuestro lado y por su apoyo incondicional

La cuenca hidrográfica del Río Cauca se destaca en el contexto nacional como un lugar estratégico, pues en ella se localizan la industria azucarera, buena parte de la zona cafetera, las zonas de desarrollo minero y agropecuario de Antioquia y el Bajo Cauca, un sector significativo de la industria manufacturera del Occidente colombiano, dos de las ciudades más pobladas del país (Cali y Medellín) y tres de las consideradas intermedias (Manizales, Risaralda y Armenia). El Río Cauca, principal afluente del Río Magdalena se puede dividir en cuatro tramos: Alto Cauca, Valle del Cauca, Cauca Medio y Bajo Cauca.

La cuenca hidrográfica del Río Cauca, denominada Valle del Cauca y ubicada en el departamento del mismo nombre, es un ecosistema que tras los años se ha visto afectado por el crecimiento vertiginoso de los centros poblados e industriales y algunos de sus tramos están muy alejados de su estado natural.

La finalidad del presente trabajo fue el de realizar un análisis espacio – temporal del índice antrópico de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauca (Tramo Valle del Cauca) a través de imágenes satelitales LANDSAT de los años 1999, 2008 y 2014 e imágenes de radar tomadas en el año 2011.

Es así, como a través de la aplicación de técnicas de Teledetección (usando imágenes Landsat y Radarsat 2), se desarrolló un Índice de Incidencia Antrópica a partir del cálculo de tres indicadores: Vegetación, Demográfico y Diseño del Cauce; indicadores que reflejan el cambio del drenaje en la cuenca. La aplicación de técnicas de teledetección permitió evaluar espacial y temporalmente grandes áreas afectadas por la actividad antrópica. Concluyendo que dicha

cuenca tiene mayor incidencia antrópica en los sectores donde se ubican los asentamientos urbanos e industriales, por ello la importancia de contar con la planificación del territorio en esta zona para disminuir los niveles de incidencia antrópica. vi

Por último, los resultados finales fueron tratados estadísticamente y plasmados en un mapa que permita identificar los sectores de la cuenca que a través de la historia han sido los más afectados por acciones antrópicas y lograr reconocer áreas donde priorizar los esfuerzos para reconstituir y preservar el sistema hídrico.

PALABRAS CLAVES: Cuenca hidrográfica – historia - impacto antrópico – datos espaciales - teledetección – índice e indicadores ambientales – vegetación – asentamientos urbanos – longitud cauce principal.

The watershed of the Rio Cauca highlighted in the national context as a strategic place, because in it the sugar industry, much of the coffee zone, the areas of mining and agricultural development in Antioquia and Low Cauca, a significant sector are located of manufacturing the Colombian West, two of the most populated cities (Cali and Medellin) and three intermediate considered (Manizales, Risaralda and Armenia). The Cauca River, the main tributary of the Magdalena River can be divided into four sections: High Cauca, Cauca's Valley, Cauca Middle and Lower Cauca.

The watershed of the Rio Cauca, called Valle del Cauca and located in the department of the same name, is an ecosystem that after years has been affected by the rapid growth of towns and industrial centers and some sections are far from its natural state.

The purpose of this study was to perform a space analysis - Temporary anthropic index Watershed Rio Cauca (Section Cauca's Valley) using Landsat satellite images from the years 1999, 2008 and 2014 and radar images taken in 2011.

Thus, as through the application of remote sensing techniques (using Landsat and Radarsat 2), it developed an incidence rate Anthropic from the calculation of three indicators: Vegetation, Vital Statistics and design Cauca; indicators that reflect the change in the drainage basin. The application of remote sensing techniques to assess spatial and temporarily allowed large areas affected by human activity. Concluding that the basin has increased anthropogenic impact on sectors where urban and industrial settlements are located, so the importance of land use planning in this area to reduce levels of anthropogenic impact.

Finally, the final results were statistically analyzed and reflected on a map to identify the areas of the basin through history have been the most affected by human actions and achieve recognize areas where prioritize efforts to reconstruct and preserve the system water. viii

KEYWORDS: Watershed - history - human impact - spatial data - remote sensing - index and environmental indicators - vegetation - urban settlements - long main channel .

Tabla de contenido

ix

Capítulo 1 Introducción	25
1. Antecedentes	25
2. Justificación y planteamiento del problema.....	28
3. Objetivos	30
3.1. Objetivo General.....	30
3.2. Objetivos Específicos.....	31
Capítulo 2.....	32
Marco Conceptual.....	32
4. La Tierra y los recursos de la Tierra	32
4.1 Cobertura y uso de la tierra	32
5. Cuenca Hidrográfica.	34
5.1 Características.	36
5.2. Red de Drenaje.....	38
5.3 Importancia del estudio y manejo de cuencas hidrográficas	39

5.4 Importancia de la evaluación de impacto ambiental en estas unidades de manejo.....	x 40
6. Herramientas para el estudio de la cobertura de la Tierra	42
6.1 Teledetección y Sensores Remotos.....	42
6.2 Interacción de la energía	47
6.3 Clasificación de sensores	53
7. Estructura y adquisición de imágenes.....	56
7.1 Resolución de una imagen	59
8. Interpretación visual de imágenes.....	63
9. Procesamiento digital de imágenes.....	66
9.1 Mejora de imágenes:	66
9.2 Procesamiento digital de imágenes:.....	67
9.3 Sistemas de Clasificación de la cobertura de la tierra.....	92
9.4 Análisis Multitemporal	95
9.5 Constelación Landsat	97
9.6 Radarsat.....	103

10. Indicadores e Índices.....	105
10.1 Indicador Demográfico	107
10.2 Indicador de vegetación	108
10.3 Indicador de modificación del diseño del cauce	109
10.4 Índice de incidencia antrópica	110
Capítulo 3.....	111
Marco Metodológico.....	111
11. Descripción del área de estudio	111
11.1 Delimitación de la Cuenca del Río Cauca.	114
11.2 Extensión y límites del área de estudio.....	115
11.3 Caracterización del área de estudio.....	116
11.4 Características Hidráulicas y Morfológicas	124
11.5 Urbanización de la Cuenca	127
11.6 Carga Contaminante.....	128
12. Zonas de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauca	130
13. Materiales y Selección de Imágenes	138

14. Equipo y Recursos	140
15. Selección de AOI (Área de Interés)	141
Capítulo 4.....	142
Metodología y Resultados Parciales	142
16. Tipo de Investigación.....	142
16.1 Desarrollo Metodológico	142
17. Preprocesamiento digital de imágenes.....	145
17.1 Imágenes Landsat.....	145
17.2 Imágenes de Radarsat 2	156
18. Procesamiento de Imágenes:.....	162
18.1 Clasificación de Imágenes	162
18.2 Validación de las imágenes ópticas (Landsat) en relación con la Radarsat 2.	171
19. Post-procesamiento: Cuantificación de coberturas en imágenes clasificadas	174
19.1 Exactitud de la Clasificación.	179
19.2 Elaboración de mapas de uso y cobertura.....	184
Capítulo 5.....	187

Estimación de Indicadores	187
20. Indicador Demográfico	188
20.1 Cálculo del Indicador Demográfico (ID).....	210
21. Indicador de vegetación	219
21.1 Calculo del Indicador de Vegetación	220
22. Indicador de modificación del diseño del cauce	224
22.1 Calculo del Indicador de Diseño de Cauce	227
Capítulo 6.....	231
23.1 Estimación del Índice antrópico.....	231
23.2 Índice Antrópico por municipio con influencia directa al Río Cauca.	236
23.2.1 Indicador Demográfico por municipio con influencia directa al Río Cauca. ..	237
23.2.2 Indicador de Vegetación por municipio con influencia directa al Río Cauca.	240
23.2.3 Indicador de Modificación de Cauce por municipio con influencia directa al Río Cauca.....	243
23.3 Índice de Incidencia Antrópica por Municipio	246
Capítulo 7.....	250

Conclusiones	250
BIBLIOGRAFIA	255
ANEXOS	263
Anexo A. Metadato imágenes Constelación Landsat TM 5	263
Anexo B. Separabilidad de ROIs – Clasificación Supervisada	264
Anexo C. Matriz de confusión – Landsat 1999	267
Anexo D- Matriz de confusión – Landsat 2008.....	270
Anexo E- Matriz de confusión – Landsat 2014	273

Lista de Tablas

xv

Tabla 1. Bandas del Espectro Electromagnético.....	46
Tabla 2. Relación de la actividad productiva pesquera en el Río Cauca.....	121
Tabla 3. Zonas de trabajo CVC.....	130
Tabla 4. Zonas de trabajo propuestas de la Cuenca del Río Cauca	134
Tabla 5. Imágenes Landsat usadas en el trabajo de investigación.....	137
Tabla 6. Imágenes Radarsat 2 usadas en el trabajo de investigación.....	138
Tabla 7. Equipos y Recursos.....	138
Tabla 8. Procedimiento corrección radiométrica imágenes Landsat.....	144
Tabla 9. Procedimiento eliminación de bandeo imágenes Landsat.....	148
Tabla 10. Procedimiento elaboración de mosaicos.....	150
Tabla 11. Procedimiento remoción de Speckle.....	155

Tabla 12. Metodología Corine Land Cover para Colombia.....	160
Tabla 13. Procedimiento Clasificación Supervisada.....	162
Tabla 14. Imagen Landsat 2014 Vs Radarsat 2.....	170
Tabla 15 Clasificación supervisada por zonas de trabajo.....	173
Tabla 16. Cálculo de áreas.....	177
Tabla 17. Procedimiento para obtener matriz de confusión.....	178
Tabla 18. Promedio de Exactitud – Coeficiente Kappa.....	181
Tabla 19. Clases (Reclasificación) Vs Clases (Corine Land Cover).....	182
Tabla 20. Población de la Cuenca Hidrográfica.....	188
Tabla 21. Ecuaciones, parámetros y gráficos de ajuste del crecimiento poblacional.....	190
Tabla 22. Tamaño poblacional para la zona Sur.....	199

Tabla 23. Tamaño poblacional para la zona Centro.....	202
Tabla 24. Tamaño poblacional para la zona Norte.....	205
Tabla 25. Cálculo de kappa.....	209
Tabla 26. Cálculo del indicador demográfico para el sector Norte del área de estudio.....	213
Tabla 27. Cálculo del indicador demográfico para el sector Centro del área de estudio.....	214
Tabla 28. Cálculo del indicador demográfico para el sector Sur del área de estudio.....	215
Tabla 29. Indicador de vegetación para la zona norte de la cuenca objeto de estudio.....	219
Tabla 30. Indicador de vegetación para la zona centro de la cuenca objeto de estudio....	219
Tabla 31. Indicador de vegetación para la zona sur de la cuenca objeto de estudio.....	220
Tabla 32. Longitud Río Cauca, año 1977.....	223
Tabla 33. Longitud Río Cauca, periodo de estudio.....	223
Tabla 34. Indicador de diseño de cauce para la zona norte de la cuenca objeto de	

estudio.....	226
Tabla 35. Indicador de diseño de cauce para la zona centro de la cuenca objeto de estudio.....	226
Tabla 36. Indicador de diseño de cauce para la zona sur de la cuenca objeto de estudio.....	227
Tabla 37. Criterios de evaluación Índice de incidencia Antrópica.....	231
Tabla 38. Índice de incidencia antrópica IIA para la zona norte del área objeto de estudio...	231
Tabla 39. Índice de incidencia antrópica IIA para la zona centro del área objeto de estudio.....	232
Tabla 40. Índice de incidencia antrópica IIA para la zona sur del área objeto de estudio....	232
Tabla 41. Valor del índice de incidencia antrópica para la cuenca en el Valle del Cauca ...	232
Tabla 42. Municipios con Influencia directa en el cauce principal del Río Cauca en el Valle del Cauca.....	235

Tabla 43. Indicador Demográfico por municipio con influencia directa al Río Cauca.....	236
Tabla 44. Indicador de Vegetación por municipio con influencia directa al Río Cauca...	238
Tabla 45. Indicador de modificación de cauce por municipio con influencia directa al Río Cauca.....	241
Tabla 46. Índice de Incidencia Antrópica por municipio con influencia directa al Río Cauca.....	244

Lista de figuras

xx

Figura 1. Megasistema de relaciones en la Cuenca Hidrográfica.....	35
Figura 2. Algunas características de cuencas pequeñas y grandes.....	37
Figura 3. Partes de una cuenca hidrográfica.....	38
Figura 4. Espectro Electromagnético.....	45
Figura 5. Efectos Atmosféricos con la energía de la radiación solar.....	48
Figura 6. Interacciones básicas entre la energía electromagnética y la superficie de la tierra.....	49
Figura 7. Curvas espectrales típicas para algunas coberturas terrestres.....	50
Figura 8. Sistema de teledetección.....	52
Figura 9. Esquema de los sensores, activo y pasivo.	55
Figura 10. Tipos de sensores.....	56

Figura 11. Formato digital de imágenes..... 59

Figura 12. Diferentes Resoluciones Espaciales..... 60

Figura 13. Sensibilidad de variables biofísicas en relación con el espectro electromagnético..... 62

Figura 14. Proceso de georreferenciación..... 78

Figura 15. Características técnicas LANDSAT 1, 2 y 3..... 98

Figura 16. Características técnicas LANDSAT 5..... 100

Figura 17. Características técnicas LANDSAT 7..... 101

Figura 18. Especificaciones Productos LDCM a Nivel 1..... 102

Figura 19. Rangos Espectrales del Sensor OLI..... 102

Figura 20. Características de Radarsat 2..... 105

Figura 21. Cuenca de drenaje del Río Cauca..... 113

Figura 22. Delimitación de la cuenca con DEM del IDEAM usando ArcHydro y cuenca delimitada por la CVC.....	114
Figura 23. Cuenca Tributaria del Valle del Cauca.....	116
Figura 24. Mapa de pendientes de la Cuenca.....	119
Figura 25. Modelo de elevaciones de la Cuenca.....	119
Figura 26. Uso actual del suelo en el Departamento del Valle del Cauca.....	123
Figura 27. Urbanización de la Cuenca del Rio Cauca.....	129
Figura 28. Zonas de trabajo de la Cuenca del Rio Cauca.....	136
Figura 29. Área de interés.....	139
Figura 30. Esquema Metodológico.....	142
Figura 31. Ajuste Geométrico de la LANDSAT 5 (PATH: 9 – ROW: 57).....	143
Figura 32. Imagen LANDSAT 8 (PATH: 9 – ROW: 57) en radiancia.....	147

Figura 33. Eliminación de bandeado Landsat 7.....	149
Figura 34. Mosaicos imágenes Landsat.....	153
Figura 35. Filtros imagen	
RS2_OK26322_PK264311_DK242715_W1_20110923_105615_HH_HV_SGF.....	156
Figura 36. Filtros imagen	
RS2_OK26322_PK264312_DK242716_W1_20110923_105636_HH_HV_SGF.....	158
Figura 37. Mosaico de Radarsat 2.....	159
Figura 38. Clasificación Supervisada Landsat 1999.....	166
Figura 39. Clasificación Supervisada Landsat 2008.....	167
Figura 40. Clasificación Supervisada Landsat 2014.....	168
Figura 41. Clasificación Supervisada Radarsat 2.....	169
Figura 42. Coberturas para cálculo de los índices.....	183

Figura 43. Mapas finales de cobertura.....	184
Figura 44. Indicador Demográfico	216
Figura 45. Indicador de Vegetación	220
Figura 46. Determinación de la longitud del cauce del Rio Cauca.....	224
Figura 47. Indicador de diseño de Cauce	228
Figura 48. Cálculo de Índice de Incidencia Antrópica.....	233
Figura 49. Cálculo del Indicador demográfico por municipio.....	237
Figura 50. Cálculo del Indicador de Vegetación.....	240
Figura 51. Cálculo del Indicador de Modificación de cauce.....	242
Figura 52. Cálculo del Índice de Incidencia Antrópica por municipio.....	246

Capítulo 1

Introducción

1. Antecedentes

“En general las metodologías utilizadas para la evaluación de impacto ambiental han empleado ponderaciones subjetivas, o mediciones de ciertos componentes en forma parcializada, en donde no se tiene en cuenta el territorio sobre el cual se desarrollan las acciones y los efectos. Esto hace que las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) no sean ajustadas, tornándose más dificultoso aún en las evaluaciones relacionadas con temas de Ordenamiento Territorial, donde la complejidad está dada no solo por la cantidad de variables a incluir sino por el nivel de interacciones a considerar”.¹

Los estudios basados a partir de análisis de imágenes satelitales, ha permitido obtener información integrada de un suceso en el territorio incorporando variables y estados en tiempo real, lo que ha permitido cuantificar el grado de afectación de los ecosistemas y los requerimientos de ordenamiento constituyéndose en estudios valiosos para la ordenación y manejo del territorio y administración de los recursos naturales.

¹ Valpreda. C. Gudiño Elina y otros. La evaluación de impacto ambiental y el Ordenamiento Territorial. Trabajo publicado en la Revista Proyección N° 2, editada por CIFOT, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, 2002..

La incorporación de indicadores geográficos en la Evaluación de Impacto Ambiental de temas tan complejos y comprometidos como los relacionados con el Ordenamiento Territorial se torna necesario debido a la propia naturaleza de ciertos fenómenos que requieren de un enfoque integral georreferenciado, con indicadores medidos en forma cualitativa o cuantitativa.

AURENSA, realizó un trabajo donde se aplicó la teledetección en el estudio de trazados lineales para obras civiles, uno de ellos consistió en la evaluación de impacto ambiental y riesgos geológicos del trazado del tramo Córdoba-Braza tortas de tren de Alta Velocidad Español, el empleo de la teledetección se llevó a cabo con el fin de seleccionar las bandas adecuadas para identificar las modificaciones ambientales, dinámica de aguas, uso del suelo, cobertura vegetal, obteniendo además a partir de esta técnica mapas de riesgos geomorfológicos, y descripción de obra.².

En el 2010 en España se realizó Análisis temporal de los cambios de usos del suelo en la cuenca del Segura mediante teledetección y la utilización de SIG para el análisis de

² Kollner Labraña & CIA LTDA (2013). Utilización de la teledetección en el estudio de trazadas lineales para obras civiles., Santiago Centro. Chile, sp.

éstos cambios mediante imágenes Landsat en el periodo 1977-2007, con importantes cambios socioeconómicos y territoriales en la Cuenca del Segura.³

En la ciudad de Sevilla, se adelantó un estudio de áreas afectadas de inundación en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete a partir de imágenes radar del satélite Terrasar-X. Rediam. Con este fin se hizo uso de la Teledetección mediante la tecnología Radar para la adquisición de imágenes de varios ámbitos de interés, a partir de las cuales se ha obtenido la localización y caracterización de las áreas afectadas. Este trabajo describe la obtención de cartografía de áreas afectadas de inundación en fases de emergencia en cinco ámbitos de la región andaluza, en donde el grado de afección ha sido especialmente relevante, concretamente en la Cuenca Guadalquivir (Andújar-Villa del Río; Alcolea-Córdoba; Palma del Río-Lora del Río; Alcolea del Río-Sevilla) y en la Cuenca del Guadalete⁴.

³ Francisco Alonso Sarria, Francisco José Gomariz Castillo, Fulgencio Cánovas García (2010). Análisis temporal de los cambios de usos del suelo en la cuenca del Segura mediante teledetección. Implicaciones sobre la degradación. ISSN 0214-1744, Vol. 24, N°. 3-4, 2010

⁴ J.J. Vales, I.R. Carpintero, L. Granado, E. Méndez, G. Montoya, I. Pino, R. Prieto, F. Giménez de Azcarate, F. Cáceres, J. M. Moreira (2010). Estudio de áreas afectadas de Inundación en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete a partir de imágenes radar del satélite Terrasar-x. Rediam., La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 587-596. ISBN: 978-84-472-1294-1.

En la provincia de Mendoza, Argentina, se realizó el estudio del impacto ambiental generado por los circuitos productivos y turísticos a partir de un análisis multicriterio, para ello tuvieron en cuenta dos aspectos, por un lado, el aspecto geográfico, que hace referencia al conjunto de condiciones que cada lugar posee y por otro el aspecto decisional, que hace referencia al proceso de toma de decisiones, en el que intervienen un conjunto de procedimientos para ponderar impactos ambientales. El estudio de estos dos aspectos puede ser abordado a partir de la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), técnicas de Teledetección y Evaluación Multicriterio (EMC), los que se constituyen importantes herramientas para el análisis territorial y la evaluación de efectos sobre el ambiente.

2. Justificación y planteamiento del problema

El río Cauca es el principal afluente del río Magdalena, tiene una longitud total de 1.350 kilómetros y una hoya hidrográfica aproximada de 63.300 Km², lo cual representa aproximadamente el 5.0 % del área de Colombia. Su trayectoria sigue una dirección Sur – Norte y sus aguas bañan los Departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquía, Córdoba, Sucre y Bolívar.

En su paso por el Departamento del Valle del Cauca, el río Cauca se recuesta hacia la cordillera Occidental a través de una planicie cuya altura oscila entre los 900 y 1.000

msnm, cuyos materiales de fondo están compuestos principalmente por depósitos aluviales. El Valle del Cauca posee un área de 448.000 hectáreas de las cuales 441.000 son aptas para la agricultura, inundándose periódicamente 100.000 hectáreas ubicadas marginalmente al río Cauca⁵.

Tras su ocupación por parte del hombre y el desarrollo de actividades como agricultura, ganadería, abastecimiento de acueductos, minería ilegal, la explotación indiscriminada de recursos naturales, entre otros, se ha incrementado la deforestación, el cambio de curso del cauce, la cobertura y uso de la tierra en la Cuenca Tributaria del Valle del Cauca.

Asimismo, en el caso de la complejidad de la Cuenca del Río Cauca en el Departamento del Valle y teniendo en cuenta las propuestas prospectivas de mejoramiento del sistema hídrico integrado se hace necesario encarar estudios histórico-descriptivos para entender el origen de la problemática y así decidir por propuestas que lleven a beneficios a largo plazo.

⁵ Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), y Universidad del Valle (2009). Modelación Matemática del Río Cauca. Volumen VIII, Fase I. Santiago de Cali, 3.1.

A nivel mundial se vienen promoviendo políticas de conservación del medio ambiente, de las cuales Colombia no es ajena, asignándole gran relevancia a los recursos naturales con los que cuenta el país. Por tal razón, se hace necesario analizar la tendencia de explotación, cambio cauce, vegetación, usos y cobertura de la Cuenca del Río Cauca en el departamento del Valle, en el marco de adopción de políticas de preservación ambiental a través de la aplicación de nuevas metodologías en el campo de la teledetección.

En el país, y en particular la zona de la cuenca del río Cauca se expresa la necesidad de disponer de un análisis espacio-temporal para contribuir a un conocimiento más profundo del sistema. Por tal razón, el presente trabajo de investigación permitió evaluar espacial y temporalmente grandes áreas afectadas por la actividad antrópica en la cuenca hidrográfica. Concluyendo que dicha cuenca tiene mayor incidencia antrópica en los sectores donde se ubican los asentamientos urbanos e industriales, por ello la importancia de contar con la planificación del territorio en esta zona para disminuir los niveles de incidencia antrópica.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Elaborar un análisis Espacio – Temporal de la Incidencia antrópica en la cuenca del río Cauca, en el departamento del Valle, a partir de la generación de un índice que muestre la incidencia antrópica y que refleje de forma sencilla la evolución de ciertos aspectos del drenaje.

3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar la distribución espacial y temporal del impacto que el hombre ha tenido sobre la Cuenca del Rio Cauca en el Departamento del Valle, en los años 1999, 2008, 2011 y 2014.
- Identificar y visualizar los sectores de la cuenca que a través de la historia han sido los más afectados por acciones antrópicas y así establecer las áreas donde priorizar los esfuerzos para reconstituir y preservar el sistema hídrico.
- Definir y estudiar un índice que refleje las características de drenaje superficial de la cuenca y que en el análisis temporal revele el alejamiento de su condición de drenaje natural.

Capítulo 2

Marco Conceptual

4. La Tierra y los recursos de la Tierra

4.1 Cobertura y uso de la tierra

La cobertura de la tierra, es la cobertura (bio) física que se observa sobre la superficie de la tierra, en un término amplio no solamente se describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino que también se describen otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua.⁶

El uso del suelo hace referencia a las funciones que se desarrollan sobre aquellas cubiertas, es la calificación de todas las actividades realizadas por el hombre sobre la cobertura del suelo, de forma parcial o permanente, con la intención de cambiarla o preservarla, para obtener productos y beneficios. Por ejemplo: la minería, la agricultura, la pesca, etc.⁷

La cobertura de la tierra y su uso representan los elementos integrantes de los recursos básicos. Los cambios en la cobertura y uso del suelo afectan los sistemas globales

⁶ IDEAM. (2014), Coberturas de la Tierra. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, consultado el 15 de octubre de 2015. Página web de servicios: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>

⁷ CVC. Guía Explicativa de la Temática De Cobertura Y Uso Del Suelo. P1. 2014

(p.ej. atmósfera, clima y nivel del mar), dichos cambios ocurren en un modo localizado que en su conjunto llegan a sumar un total significativo y se reflejan en buena medida la cobertura vegetal, razón por la cual se toman como referencia para algunas aplicaciones que van desde el monitoreo ambiental, la producción de estadísticas como apoyo a la planeación, evaluación del cambio climático y la evaluación de los procesos de desertificación, entre otros.⁸

Los cambios en la cubierta y usos del suelo que soporta la tierra son cada vez más relevantes para poder analizar los elementos de fricción entre las sociedades humanas y los ecosistemas terrestres que les sirven de soporte. Conceptualmente hay que diferenciar entre los términos de cobertura del suelo y uso del suelo.

Resumidamente, se puede afirmar que la cobertura hace referencia al aspecto morfológico y tangible del suelo, mientras que los usos hacen referencia a las funciones que se desarrollan sobre aquellas cubiertas. En consecuencia, una misma cubierta puede soportar diferentes usos (recolección, silvicultura y caza sobre cubiertas forestales) y un mismo uso puede desarrollarse sobre diferentes cubiertas (excursionismo sobre cubiertas agrícolas, forestales o urbanas).⁹

⁸ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: Escala 1:250.000: Serie III. México: INEGI. 2009. P. 7

⁹ CVC. Guía Explicativa De La Temática De Cobertura Y Uso Del Suelo. P1. 2014

5. Cuenca Hidrográfica.

La cuenca se constituye en una unidad adecuada para la planificación ambiental del territorio, dado que sus límites fisiográficos se mantienen un tiempo considerablemente mayor al de otras unidades de análisis, además involucra una serie de factores y elementos tanto espaciales como sociales, que permiten una comprensión integral de la realidad del territorio.¹⁰

Como subsistema biofísico la cuenca está constituida por una oferta ambiental en un área delimitada por la divisoria de aguas y con características específicas de clima, suelo, bosques, red hidrográfica, usos de suelo, componentes geológicos, etc. Como subsistema económico la cuenca presenta una disponibilidad de recursos que se combinan con diversas técnicas para producir bienes y servicios; es decir, en toda cuenca existen alguna o algunas posibilidades de explotación o transformación de recursos. El subsistema social involucra las comunidades humanas asentadas en la cuenca, acceso a servicios básicos, estructura organizativa, actividades, entre otros, que necesariamente causa impactos sobre el ambiente natural. También incluye el conjunto de valores culturales y tradicionales, creencias de las comunidades asentadas. La cuenca hidrográfica es una unidad espacial definida por un complejo sistema de interacciones físicas, bióticas, sociales y económicas. La

¹⁰ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Guía Técnica Para La Formulación De Los Planes De Ordenación Y Manejo De Cuencas Hidrográficas. Versión 1.0. 2013. P 18

interdependencia de los elementos que constituyen la cuenca es evidente en muchos casos.¹¹

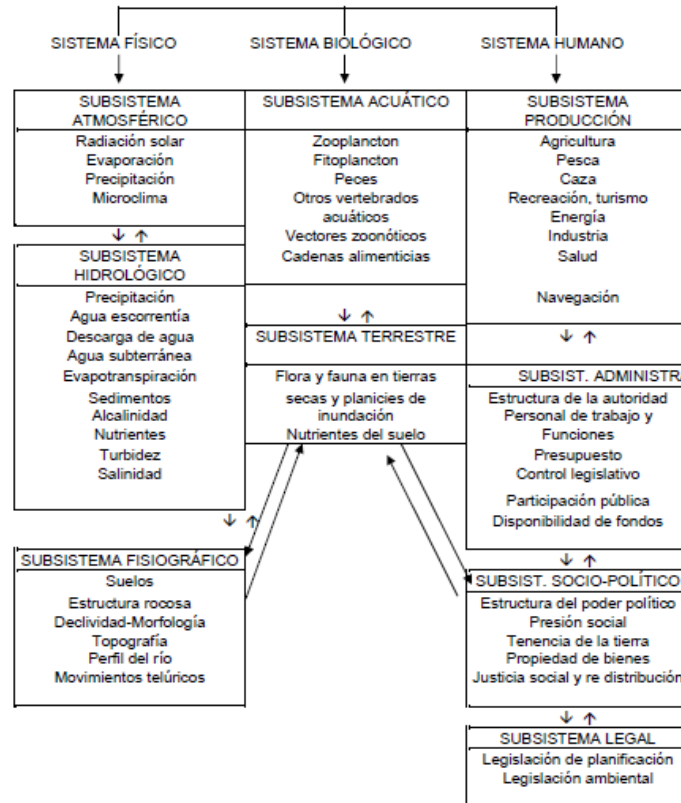


Figura 1. Megasistema de relaciones en la Cuenca Hidrográfica.

Fuente: Universidad del Tolima. 2001¹²

¹¹ LONDOÑO, C. CUENCAS HIDROGRÁFICAS. Universidad del Tolima. 2001.

¹² LONDOÑO, C. CUENCAS HIDROGRÁFICAS. Universidad del Tolima. 2001. P 60.

5.1 Características.

La identificación geomorfológica de una región es de fundamental importancia, puesto que constituye uno de los factores principales que dominan la dinámica hídrica (Lexow, 2002). La morfología regional, condicionada por procesos de sedimentación, erosión, depositación y transporte da lugar a la existencia de cuencas hidrográficas. El agua, a través de su capacidad de erosión y transporte de sedimentos, se comporta como un factor relevante en el modelado de la superficie terrestre y de sus paisajes (Melo, 2003).

La caracterización geomorfológica ambiental de una cuenca fluvial se determina en primera instancia por su conocimiento morfométrico. Este último es uno de los aspectos más influyentes en la ecología acuática, dado que muchos indicadores, composición físico-química, sedimentación dependen de la forma de la cuenca. La morfometría sirve, además, para hallar parámetros que caractericen un ambiente geomorfológico y que sean susceptibles de un tratamiento estadístico que permita disminuir la subjetividad en las conclusiones (Doffo y Bonorino, 2005).¹³

¹³ GERALDI, A.PICCOLO, C. PERILLO, G. DELIMITACIÓN Y ESTUDIO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS CON MODELOS HIDROLÓGICOS Instituto de Geografía Universidad de Alicante Investigaciones geográficas, N° 52 215 - 225 ISSN: 0213-4691

Procesos	Cuenca pequeña	Cuenca grande
Factor dominante en los caudales de crecida.	Escorrimento superficial en las vertientes.	Escorrentía en el cauce.
Sensibilidad.	a) A lluvias de alta intensidad y corta duración. b) Uso de la tierra (manejo de la tierra).	La sensibilidad a estos factores es suprimida por el efecto de almacenamiento en el valle.
Efecto del escurrimiento.	El efecto del escurrimiento superficial en las vertientes predomina en los picos de crecida. De ahí la importancia del uso de la tierra y manejo de las vertientes en general.	El efecto del almacenamiento en el valle determina las características del pico de crecida.
Crecidas e inundaciones.	Súbitas y violentas.	Lentas y de larga duración.
Arrastre de material.	Arrastre de gran cantidad de sedimentos, con alto porcentaje de material de gran diámetro.	Arrastre moderado de material, de baja granulometría.
Caudal de estiaje.	Reducido o nulo.	Regular, régimen hídrico permanente.
Pendiente media.	Pronunciada.	Suave.
Tamaño.	Menor de 130 Km ² .	Mayor de 130 Km ² .

Figura 2. Algunas características de cuencas pequeñas y grandes.

Fuente: Universidad del Tolima. 2001¹⁴

La cuenca hidrográfica se puede dividir teniendo en cuenta diversos criterios como altitud y topografía, en estas áreas, la variación puede influir en el comportamiento social, económico, climático etc.¹⁵

¹⁴ LONDOÑO, C. (2001). CUENCAS HIDROGRÁFICAS. Universidad del Tolima. P 60.

¹⁵ CATIE, (n.d. (no date [sin fecha])). Manejo de cuencas Hidrográficas. WORLD VISION. Pág. 13.



Figura 3. Partes de una cuenca hidrográfica

Fuente: CATIE. World visión.n.d.¹⁶

5.2. Red de Drenaje

Se entiende por red de drenaje, al sistema de cauces por el que fluyen los escurrimientos de manera temporal o permanente. El concepto de red de drenaje involucra diversos parámetros que influyen en la formación y rapidez de drenado, también pueden dar una idea de las condiciones físicas del suelo y de la superficie de la cuenca; los parámetros más importantes son Tipos de Corrientes, Modelos de Drenaje, Orden de Corrientes, Relación de Bifurcación, Densidad de Drenaje y Frecuencia de Corrientes.

¹⁶ CATIE, (n.d. (no date [sin fecha])). Manejo de cuencas Hidrográficas. WORLD VISION. Pág 13.

5.3 Importancia del estudio y manejo de cuencas hidrográficas

Un caudal regulado es sin duda el servicio más sobresaliente que las cuencas ofrecen a la sociedad, pero no es el único. El suelo rico de agua de las laderas de la cuenca muchas veces propicia el crecimiento de árboles y arbustos, vegetación que frena la erosión de la escorrentía, es decir, la eliminación del suelo que el agua se lleva. En particular, las raíces profundas y enredadas de los bosques contribuyen a dar cohesión a las capas superficiales del terreno.¹⁷

Las relaciones naturales, espaciales y de asentamientos humanos de las cuencas son muy variadas, porque cada una resulta en una especificidad. En cada cuenca donde se localizan asentamientos humanos debería evaluarse su capacidad de carga en relación a la densidad demográfica y su reproducción, considerando que una cuenca cuenta con una capacidad finita de recursos físicos y biológicos. La relación de estos con el volumen de la demanda de las necesidades humanas constituye su capacidad de carga y es expresada como un umbral en el que la base natural y los recursos pueden reciclarse, regenerarse, reproducirse y producirse. Una vez abatida dicha capacidad, el deterioro progresivo es irreversible. Por lo anterior, las cuencas idealmente deben de mantenerse en un umbral positivo y la lógica de las sociedades que las habitan debe buscar constantemente el balance hacia márgenes positivos mayores sin que ello necesariamente implique, restricciones en la satisfacción de

¹⁷ FAO. (2009). ¿Por qué invertir en ordenación de cuencas hidrográficas? Servicios de las cuencas hidrográficas. P 6.

necesidades económicas, sociales y culturales. También en términos ideales, cada cuenca debe alcanzar su propia sustentabilidad y no incorporar artificialmente recursos naturales provenientes de otras cuencas¹⁸

5.4 Importancia de la evaluación de impacto ambiental en estas unidades de manejo.

Hace algunos años el término cuenca hidrográfica, estaba reservado casi exclusivamente para los hidrólogos y otros científicos como geólogos y geógrafos, sin embargo, hoy día se ha popularizado al punto que muchos alcaldes de varios municipios, se preocupan finalmente de las cuencas de donde se abastecen de agua y donde pueden provenir eventualmente graves peligros de inundación.

Entre las razones de este interés se pueden mencionar las siguientes¹⁹:

- a. Una creciente competencia por el uso del agua en cantidad y calidad, que solo se puede evitar conciliando los intereses de los usuarios mediante un manejo integral del recurso en cada cuenca.
- b. Ocupación de zonas con alto riesgo, como zonas de inundación y zonas de deslizamientos e incluso zonas de gran escasez de agua.

¹⁸ DARDON, J. MORALES,p. La cuenca hidrográfica y su importancia para la gestión regional del desarrollo sustentable del altiplano occidental de Guatemala. CENTRO PLURICULTURAL PARA LA DEMOCRACIA C P D. 2002.

¹⁹ UMAÑA, E. Manejo de Cuencas Hidrográficas y Protección de Fuentes de Agua. Universidad Agraria. SAN NICOLAS, ESTELI. 2002.

- c. Incremento de los usuarios del recurso agua, donde se compite no solo con la agricultura (riego) pero también con otros usos (por ejemplo, crianza de peces).
- d. El impacto de los fenómenos naturales extremos, como sequías, inundaciones y grandes deslizamientos, han obligado a que los usuarios, deban aunar esfuerzos, aunque esto es todavía muy incipiente en las cuencas.
- e. Existen aportes de organismos internacionales y de asistencia bilateral que tienen acciones vinculadas a la temática de cuencas han contribuido en forma directa e indirecta a crear conciencia sobre la necesidad del manejo de las cuencas hidrográficas.
- f. Existen acuerdos internacionales sobre la temática ambiental, en general y sobre el agua en particular que también han fomentado el enfoque a nivel de cuencas hidrográficas.
- g. Se promueven actividades de difusión y capacitación, que tienen como tema central, la gestión de cuencas

Hay dos aspectos muy importantes que presentan las Cuencas Hidrográficas y están referidos a los siguientes:

- a. Posibilidad de organizar a la población, en relación a la temática ambiental en función de un recurso (el agua) y un territorio compartido (la cuenca) superando la barrera impuesta por los límites político-administrativos y facilitando las comunicaciones entre ellos.

b. Mayor facilidad para la ejecución de acciones dentro de un espacio donde se puede conciliar los intereses de los distintos actores en torno al uso del territorio de la cuenca, al uso múltiple del agua y el control de fenómenos naturales adversos.

6. Herramientas para el estudio de la cobertura de la Tierra

6.1 Teledetección y Sensores Remotos

Teledetección es el vocablo usado por los hispanoparlantes para referirse al término inglés “remote sensing”, que se traduce literalmente como percepción remota. Se refiere a la ciencia, técnica o, incluso “arte” para algunos, de obtener información (imágenes) de la superficie de nuestro planeta a distancia, sin entrar en contacto directo con él. Pero la teledetección también incluye todo el trabajo realizado a posteriori con esas imágenes, es decir, su procesamiento e interpretación.²⁰

La Teledetección espacial dispone de una serie de ventajas indiscutibles en comparación con otros sistemas convencionales de observación de la Tierra como la fotografía aérea o la observación directa, a través de trabajos de campo. Entre las principales ventajas, se resaltan las siguientes: (i) visión global, (ii) observación de

²⁰ SATELMAC. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio.P.9

información en regiones no visibles del espectro, (iii) observación a distintas escalas, (iv).²¹

La radiación electromagnética (EMR) es una forma de energía que puede ser únicamente observada por su interacción con la materia. La EMR está hecha de componentes eléctricos y magnéticos y es afectada por las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia con la cual entra en contacto. Dos hipótesis son generalmente utilizadas para describir el comportamiento de la EMR: el modelo de onda y el modelo de partículas. Ambos modelos son válidos y ambos son importantes para percepción remota: para especialistas en aplicaciones, sin embargo, el modelo de onda es generalmente favorecido.²²

Los distintos tipos de radiación electromagnética dependen directamente de las características de la onda, que son: frecuencia, longitud de onda y amplitud o intensidad. En realidad, la frecuencia y la longitud de onda están directamente relacionadas, por lo que, para describir completamente una onda, (la radiación electromagnética en nuestro caso) basta con dar información acerca de su amplitud y frecuencia (o longitud de onda).

Estas dos variables están asociadas de la siguiente manera:

²¹ MARTINEZ, J., MARTIN, M.P., (2010). Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. Red Nacional de Teledetección Ambiental. P. 9

²²REUTER, F.(2009). Principios de Teledetección. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago. p.6

$$c = \lambda * \nu$$

donde, c: velocidad de la luz (3x10⁸m/s);

λ : longitud de onda (m);

ν : frecuencia (ciclos por segundo, Hz).

Por otra parte, la teoría cuántica nos explica el fenómeno de la radiación electromagnética basándose en sus propiedades energéticas siendo la fórmula esencial la siguiente:

$$Q = h * F$$

Donde Q es la cantidad de energía transportada por una onda, h es una constante (la constante de Planck) y F es la frecuencia. Despejando F en la fórmula precedente y sustituyendo nos encontraríamos con la siguiente expresión:

$$Q = h \left(\frac{c}{\lambda} \right)$$

Del análisis de esta expresión se deduce que a medida que trabajemos con longitudes de onda mayores, sus contenidos energéticos serán menores y por tanto habrá más dificultades para la detección de estas radiaciones.

En el momento actual de desarrollo tecnológico los sensores espaciales utilizan un ámbito reducido de longitudes de onda que van desde el espectro visible, comprendido entre 0.4 y 0.7 micras, hasta el dominio de las microondas (ondas de más de 1 milímetro), pasando, en

un emplazamiento intermedio, por las regiones espectrales del infrarrojo (próximo, medio y térmico).

En la figura 4, se muestra de manera gráfica el espectro de energía electromagnética en función de su longitud de onda y su frecuencia y en la Tabla No. 1 las bandas del espectro electromagnético²³.

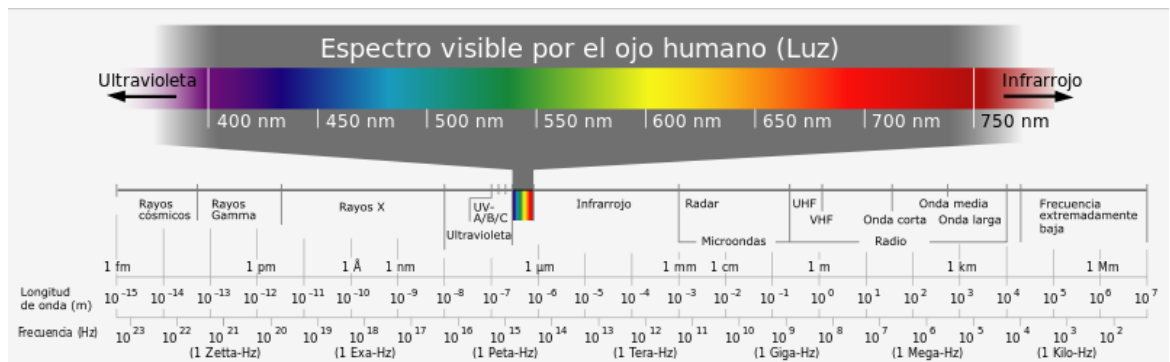


Figura 4. Espectro Electromagnético

Fuente: Pérez 2006

²³ PEREZ, C. (2006). Teledetección: Nociones y Aplicaciones. p38

Tabla 1. Bandas del Espectro Electromagnético.

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Rayos gamma	$< 10 \times 10^{-12} \text{m}$	$> 30,0 \times 10^{18} \text{Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
Rayos X	$< 10 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 30,0 \times 10^{15} \text{Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
Ultravioleta extremo	$< 200 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 1,5 \times 10^{15} \text{Hz}$	$> 993 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Ultravioleta cercano	$< 380 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 7,89 \times 10^{14} \text{Hz}$	$> 523 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Luz Visible	$< 780 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 384 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 255 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo cercano	$< 2,5 \times 10^{-6} \text{m}$	$> 120 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 79 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo medio	$< 50 \times 10^{-6} \text{m}$	$> 6,00 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo lejano/sub milimétrico	$< 1 \times 10^{-3} \text{m}$	$> 300 \times 10^9 \text{Hz}$	$> 200 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
Microondas	$< 10^{-2} \text{m}$	$> 3 \times 10^8 \text{Hz}^{\text{n. 1}}$	$> 2 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
Ultra Alta Frecuencia - Radio	$< 1 \text{ m}$	$> 300 \times 10^6 \text{Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-26} \text{ J}$
Muy Alta	$< 10 \text{ m}$	$> 30 \times 10^6 \text{Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-28} \text{ J}$

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Frecuencia - Radio			
Onda Corta - Radio	< 180 m	> $1,7 \times 10^6$ Hz	> $11,22 \cdot 10^{-28}$ J
Onda Media - Radio	< 650 m	> 650×10^3 Hz	> $42,9 \cdot 10^{-29}$ J
Onda Larga - Radio	< 10×10^3 m	> 30×10^3 Hz	> $19,8 \cdot 10^{-30}$ J
Muy Baja Frecuencia - Radio	> 10×10^3 m	< 30×10^3 Hz	< $19,8 \cdot 10^{-30}$ J

Fuente: Pérez 2006

6.2 Interacción de la energía

<p><u>Con la atmósfera</u></p>	<p>Dispersión: Ocurre cuando partículas en suspensión y moléculas de gases presentes interactúan y causan la redirección de la radiación electromagnética, modificando su camino inicial. La magnitud de la dispersión que ocurra, depende de factores como: longitud de onda, abundancia y concentración de partículas y gases en el medio, y</p>
---------------------------------------	--

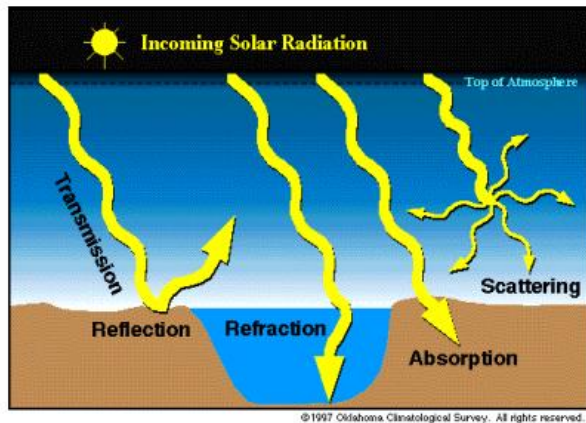


Figura 5. – Efectos Atmosféricos con la energía de la radiación solar.

Fuente: CCRS 1998

la distancia que deba cruzar la radiación (CCRS, 1998; Lillesand y Kiefer, 1999).

Absorción: En contraste con la dispersión, este mecanismo implica que moléculas de gases de la atmósfera absorben la radiación de diferentes longitudes de onda.

Los fenómenos de dispersión y absorción que ocurren al momento del ingreso de la energía a la atmósfera también se presentan en ocasión de la salida de dicha energía (por la reflectancia). El resultado es que el sensor remoto capta una mezcla final compuesta de la radiación proveniente del objeto en el cual incidió directamente y también de aquella que haya sido dispersada inicialmente por la atmósfera. El efecto final de distorsión de la reflectancia de cada objeto es también función de la longitud de onda (Lillesand y Kiefer, 1999).

Con los rasgos terrestres

La radiación entrante que logra escapar a

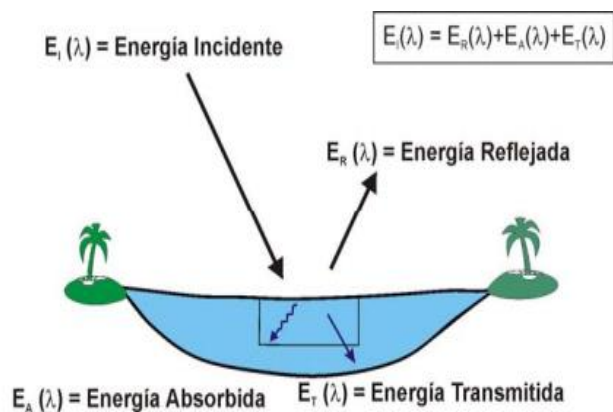


Figura 6. – Interacciones básicas entre la energía electromagnética y la superficie de la tierra.

Fuente: CCRS 1998

los fenómenos de dispersión y absorción provocados por la atmósfera terrestre, interactúa con los objetos de la superficie de la tierra (CCRS, 1998; Lillesand y Kiefer, 1999). Existen tres diferentes formas de interacción que pueden presentarse al momento del contacto (energía incidente). Estas son:

Absorción: ocurre cuando la energía es absorbida por el objeto;

Reflexión: ocurre cuando la radiación rebota en el cuerpo y es redireccionada (la percepción remota está dirigida, en la mayoría de los casos, a registrar la magnitud de la reflectancia de objetos en la superficie terrestre). Cuando la superficie del objeto es fina y suave, la reflexión ocurrida se denomina especular, o tipo espejo, y cuando la superficie es irregular, se denominará reflexión difusa;

Transmisión: ocurre cuando la radiación simplemente atraviesa el objeto sobre el cual incide directamente.

La energía total incidente interactuará de una o varias maneras con los objetos en la superficie y la proporción en que esto ocurra será función de la longitud de onda, del material y condición del objeto. Si se grafica la relación existente entre la reflectancia espectral de un objeto contra la longitud de onda de la energía reflejada que es captada por el sensor remoto, se obtiene una curva de reflectancia espectral (o respuesta espectral del objeto)²⁴.

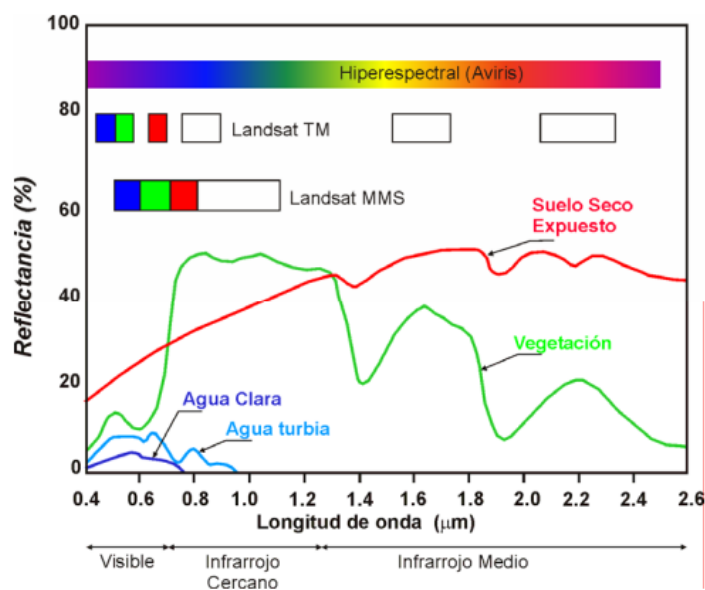


Figura 7. Curvas espectrales típicas para algunas coberturas terrestres

Fuente: Editada de Chuvieco, 2001

²⁴ CORONADO, L. (2001). Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica. Disponible en: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr/bitstream/handle/2238/434/tesis-digital.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

En la figura anterior, se muestra de manera ilustrativa los trazados espectrales de cuatro tipos de cobertura. Las curvas de respuesta espectral permiten poder distinguir tipos o clases de objetos presentes en la superficie terrestre (agua de vegetación, bosques de desiertos o bien tipos de cultivos, entre otros ejemplos posibles). Después de haber estudiado de manera continua las curvas de reflectancia para un objeto en particular, es posible distinguir lo que se denomina, firma espectral. Idealmente esta respuesta espectral debería ser constante para cada rasgo de la superficie, sin embargo, se conoce que esta respuesta puede cambiar.

Así entonces, los instrumentos de percepción remota que cumplen la función de obtener información de objetos, áreas o fenómenos, a través del análisis de datos adquiridos sin estar en contacto directo con el objeto, área o fenómeno bajo investigación, se instalan en plataformas aéreas o satelitales para mapear, monitorizar e inventariar recursos naturales y artificiales. Un sistema de teledetección espacial está compuesto por los siguientes elementos:

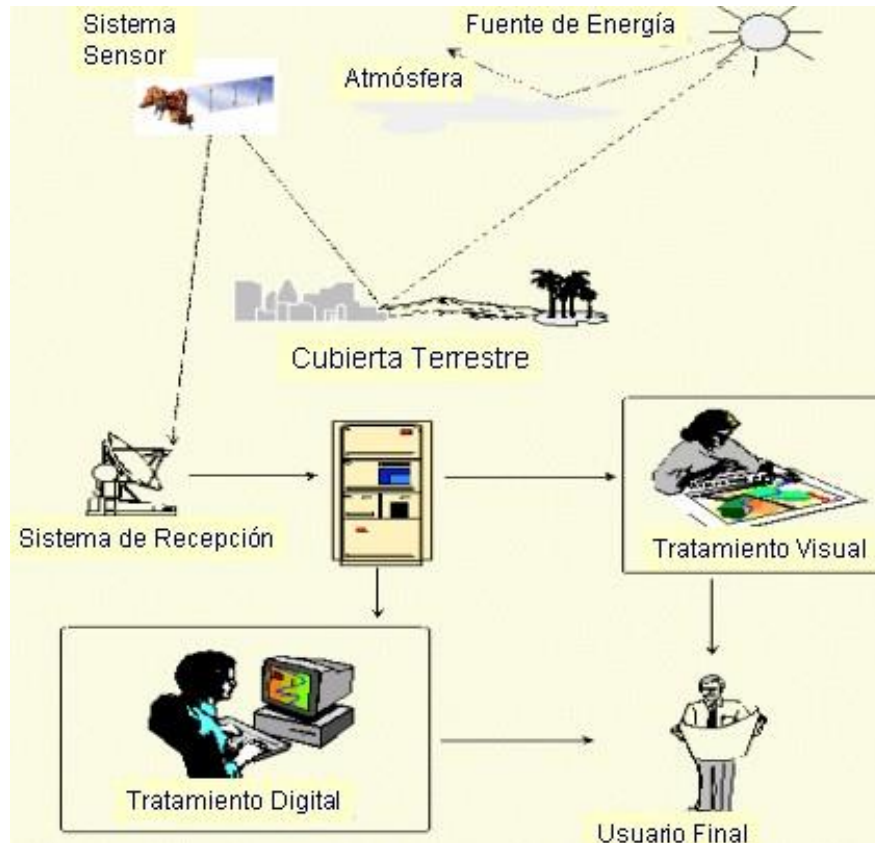


Figura 8. Sistema de teledetección

Fuente: Chuvieco, 1996; IGAC Principios Básicos de Cartografía Temática, 2008.

Lillesand y Kiefer (1999), describen el proceso que se sigue para registrar datos provenientes de fenómenos remotos. Los autores, establecen dos fases elementales del proceso: adquisición de datos y análisis de datos. Los elementos que atañen a la primera fase son:

- Propagación de la energía a través de la atmósfera;
- Interacción de la energía con los rasgos de la superficie de la tierra;
- Retransmisión de la energía a través de la atmósfera;

- Nivel de ubicación de los sensores remotos (aéreo o espacial);
- Generación de datos del sensor en forma pictórica o digital.

De manera similar, para la segunda fase del proceso, los elementos constituyentes son:

- Examinar los datos producidos por medio de dispositivos de despliegue de imágenes o bien a través de análisis digital con computadoras. Dicho paso incluye la utilización de recursos de referencia, tales como mapas de suelos, mapas de topografía, mapas de zonas de vida, estadísticas de cosechas o bien registros de chequeo en el campo.
- Cada paquete de información generado por los pasos anteriores, representa capas de datos a ser ingresados a un Sistema de Información Geográfica (SIG), con el fin de generar nueva y diversa información que será presentada a los usuarios para su aplicación en la solución de problemas reales.

6.3 Clasificación de sensores

6.3.1 Tipos de Sensores Remotos.

Los sistemas o dispositivos de sensores remotos pueden recibir radiación electromagnética proveniente de la superficie de la Tierras en cualquier rango de longitudes de onda, sensible al detector. Sin embargo, por razones técnicas y atmosféricas, los rangos más utilizados para usos de recursos naturales son de 0,4 a 0,13 micrones (visible e

infrarrojo) y entre 30 y 300 milímetros (microondas). Los sensores se pueden clasificar según el origen, la categoría y tipo de radiación²⁵.

Se emplea comúnmente al Sol como la fuente de energía que genera una cadena de fenómenos de interacción con los rasgos terrestres estudiados y que finalmente producen sobre los sensores remotos, respuestas espectrales particulares que permiten su identificación. Sin embargo, no todos los sensores remotos emplean al Sol como su fuente energética inicial. Por eso se debe hacer diferencia entre sensores remotos pasivos y activos. A continuación, se describen las características generales de cada uno:

6.3.1.1 Sensores Pasivos.

Son aquellos sensores que sólo pueden ser empleados en detectar energía cuando existe una fuente natural o externa (Sol). En la mayoría de los casos, solamente es posible el funcionamiento de dichos sensores en el día. La actividad en la noche es mínima, y solo podría ser captada la energía emitida por los mismos objetos (siempre existente cuando se posee una temperatura por arriba del cero absoluto, -273°C);

6.3.1.2 Sensores Activos.

Estos dispositivos disponen de su propia fuente de energía la cual proyectan hacia los objetos de interés, a fin de obtener la respuesta espectral buscada, ejemplo radar.

²⁵ BADARACCO. R. (2012). Detección de la Salinidad en los Suelos de Cultivos de Algodón usando Imágenes de Satélite en la Costa Norte del Perú. P 38, Consultado el 20 de diciembre de 2015 en: http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/3071/1/Badaracco_mr.pdf

Estos presentan una ventaja sobre los sensores pasivos, ya que pueden obtener mediciones sin importar la hora del día o estación del año. Además, son la opción para estudiar la respuesta espectral de objetos con respecto a longitudes de onda de menor energía incidente (microondas), e inclusive no se ven afectados por la presencia de nubes.

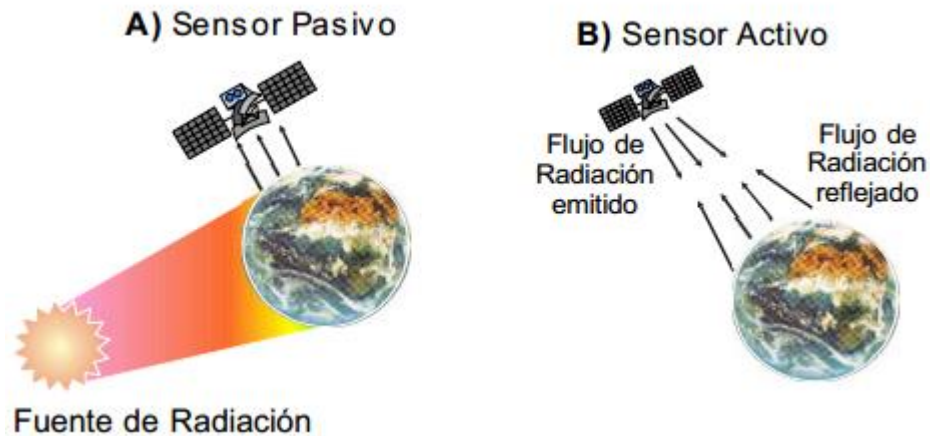
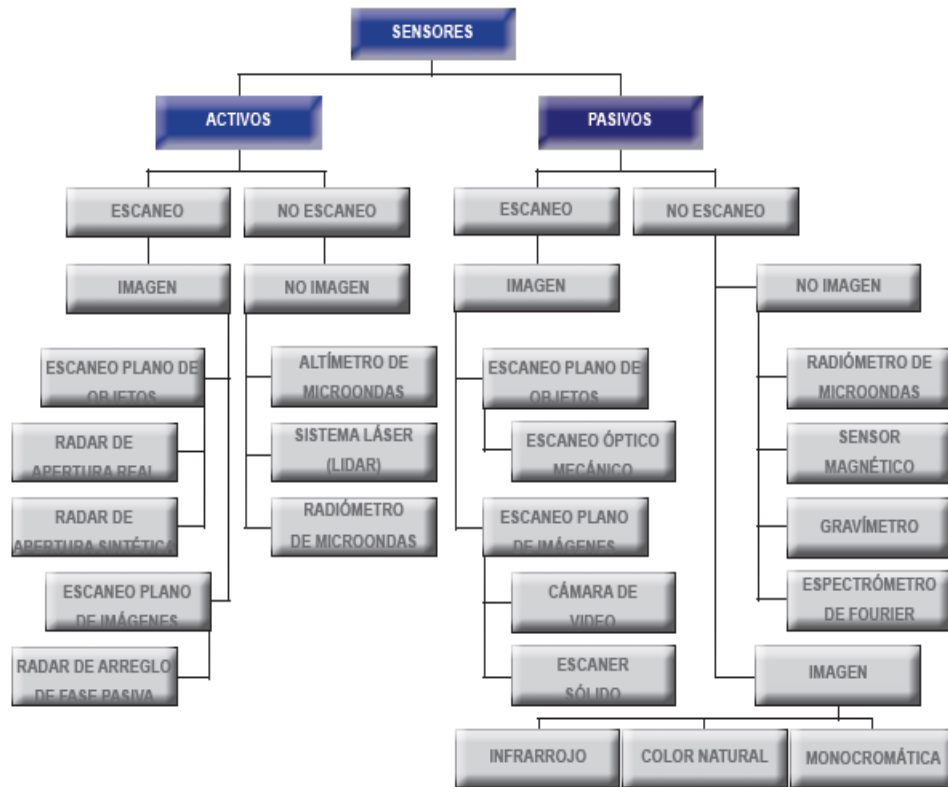


Figura 9. Esquema de los sensores, activo y pasivo.

Fuente: Pérez, 2006

Los sensores activos y pasivos se agrupan en dos categorías: 1) de escaneo (scanning), y 2) de no escaneo (not scanning), como se puede observar en el siguiente diagrama:



Adaptado de Maini y Agrawal, 2007

Figura 10. Tipos de sensores

Fuente: Revista Análisis Geográficos No. 40, IGAC, 2008

7. Estructura y adquisición de imágenes

En la obtención de los Datos hay que considerar la propagación de la energía electromagnética a través de la atmosfera y su interacción con la superficie terrestre. La detección de energía electromagnética puede llevarse a cabo tanto de manera fotográfica como electrónica. En la primera opción, se emplea una superficie (papel o plástico impregnados) sensible a la luz, a fin de detectar variaciones de energía dentro de una

escena. La detección electrónica implica la generación de señales eléctricas que corresponden a variaciones de energía en la escena original.

Igualmente, el término imagen, se utiliza para expresar cualquier representación gráfica de datos (Lillesand y Kiefer, 1999). Aunque si bien es cierto, la interpretación visual de imágenes representa una herramienta bastante tratada para la extracción de información de sensores remotos, es posible que, por su relativa simplicidad, deje de lado información inherente a cada rango del espectro captado. En ese caso se prefiere analizar de modo digital las imágenes obtenidas.

Una imagen digital está compuesta por un arreglo de dos dimensiones de elementos gráficos o píxeles (es decir está compuesta por una grilla la cual está formada por celdas). Esta estructura de grilla, también llamado raster tiene un arreglo espacial según un sistema de coordenadas formado por líneas horizontales “rows” y columnas verticales “samples”. Cada una de esas celdas de la imagen raster, se denomina píxel. La intensidad de cada píxel, corresponde al promedio del brillo o reflectancia captada por el sensor sobre un área del suelo. Cada píxel tiene asociado un número digital (DN, del inglés digital number), en el rango de 0 a 255, que son valores enteros positivos resultado de la cuantificación de la señal eléctrica original (Lillesand y Kiefer, 1999).

Esta situación da lugar a diferentes modos de organización de los archivos de imagen conocidos como formatos de la imagen, siendo los más comunes los siguientes: BSQ (Bandas secuenciales), BIL (Bandas intercaladas por líneas), BIP (Bandas intercaladas por píxeles).

Bandas secuenciales (BSQ): Los Nd se disponen uno a continuación de otro, hasta completar la banda. A continuación, se ubican los de la siguiente banda y así sucesivamente hasta completar la imagen multiespectral. Entre banda y banda se insertan un fichero de cola y otro de encabezamiento que contiene información sobre la longitud de onda de la banda correspondiente. Este formato es propio de las imágenes Landsat – TM.

Bandas intercaladas por líneas (BIL): Los Nd se ordenan por línea, es decir se graba la primera línea de todas las bandas, luego la segunda y así sucesivamente. Este formato es característico de las imágenes SPOT – HRV y uno de los más comunes. Es muy apropiado para el uso de subimágenes.

Bandas intercaladas por píxel (BIP): En este formato se almacena secuencialmente el Nd del píxel de cada banda, es decir se carga el valor de primer píxel de la banda uno, luego el primer píxel de la banda dos, etc, hasta completar la totalidad de las bandas. Luego se almacena el segundo píxel de la banda uno, el segundo píxel de la banda dos, hasta completar el número de bandas y así sucesivamente. Este formato resulta adecuado para operaciones entre píxeles.

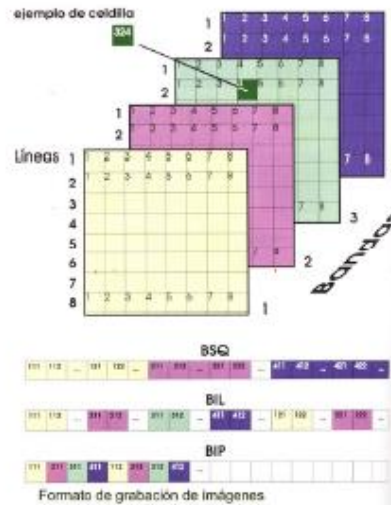


Figura 11. Formatos digitales de imágenes.

Fuente: Chuvieco 2001

7.1 Resolución de una imagen

La resolución es un parámetro que describe el número de píxeles que el usuario puede desplegar en un dispositivo (monitor) o el área que el píxel representa en la imagen en la superficie terrestre. Esta se divide en:

7.1.1 Resolución espacial (geométrica).

Es la medida del objeto más pequeño que los sensores pueden registrar en la superficie de la tierra, y está representada por cada píxel. Cuando menor es el objeto que se puede registrar, mayor es la resolución espacial.

La forma más común de determinar la resolución espacial de un sensor es por el campo de visión instantáneo (IFOV) del sensor, el cual representa el tamaño de cada píxel.

El IFOV se define como la sección angular, medida en radianes, observado en un momento determinado.

La resolución espacial tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen, por cuanto marca, de alguna forma, el nivel de detalle que esta ofrece y guarda estrecha relación con la escala de trabajo y con la fiabilidad finalmente obtenida en la interpretación (Chuvieco, 2001).

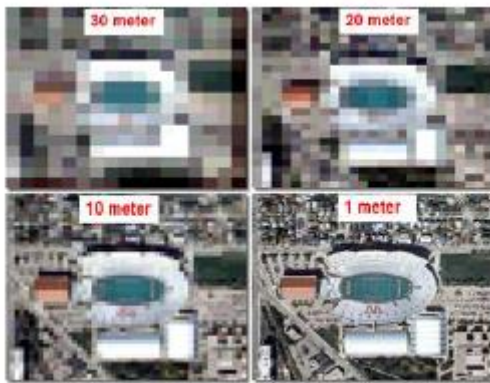


Figura 12. Diferentes Resoluciones Espaciales.

Fuente: Chuvieco 2001

7.1.2. Resolución radiométrica.

Este parámetro indica la capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiación espectral que recibe. Para fotografías aéreas y otras imágenes en formato análogo, los niveles de gris están considerados como la resolución radiométrica. Cuanto mayor es el número de niveles de grises, mayor es la resolución. Una imagen con dos niveles (blanco y negro) tendrá menos resolución que otra imagen con 32 niveles de grises entre el blanco y el negro.

Las imágenes óptico-electrónicas, en formato digital, se identifican por el rango de valores que codifica el sensor y se expresa por el número de bits. El valor de bits se expresa en potencia de 2^n , siendo n el número de bits usados en la grabación.

Cuanto mayor sea la precisión radiométrica, tanto mejor podrá interpretarse la imagen.

7.1.3 Resolución espectral.

Es la capacidad del sensor para distinguir energía proveniente de diferentes longitudes de ondas. Está directamente relacionado con dos parámetros: 1) el valor de intervalos de longitud de onda, y 2) la cantidad de bandas que el sensor puede registrar en el espectro electromagnético.

Existen tres tipos de imágenes, según su sensibilidad a alguna porción del rango del espectro electromagnético captado: pancromáticas, multiespectrales e hiperespectrales.

Las imágenes pancromáticas, captan una extensa porción de energía del espectro electromagnético, que normalmente agrupa el rango visible e infrarrojo cercano, comprendido entre 0,5 a 0,9 μm , en una sola banda. Las imágenes pancromáticas se representan comúnmente los tonos de blanco y negro. Cuando un sensor posee detectores operando en más de una banda del espectro, el sistema se llama multiespectral, porque registra la radiación electromagnética, en varias longitudes de onda o fajas espectrales y generalmente registran rangos del espectro que van del visible (0,4 a 0,7 μm) a infrarrojo (0,9 a 12 μm) y la amplitud de cada una de las bandas espectrales es mayor de 0,05 μm o 50

nm. Cuando el sensor posee más de 100 bandas, el sensor es hiperespectral y tienen ancho de bandas que oscila alrededor de 10 nanómetros.

Si los intervalos de banda que registra son anchos, la resolución espectral será grosera (mala), mientras que, si los intervalos son estrechos, la resolución espectral será fina (buena). Es decir, cuanto mayor es el número de bandas y menor el ancho del intervalo, mayor será la resolución espectral.

Es así, que para tomar la decisión sobre qué tipo de imágenes se va a necesitar en un estudio específico (Chuvienco, 1995), se debe tener claro en que banda del espectro electromagnético tendríamos mejor discriminación y análisis. En la siguiente figura, se extractan algunas utilidades por banda.

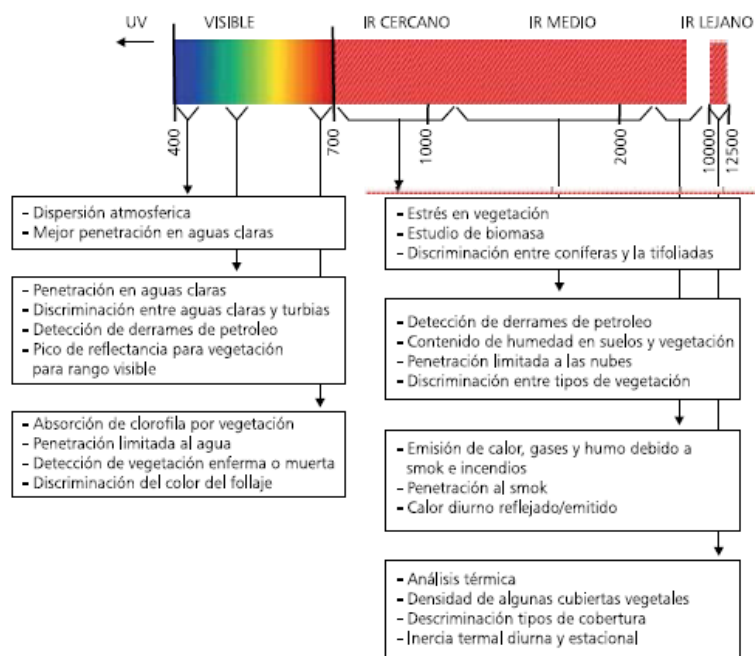


Figura 13. Sensibilidad de variables biofísicas en relación con el espectro electromagnético

7.1.4 Resolución temporal.

Es el lapso de tiempo necesario para que el satélite portador del sensor, cubra nuevamente una misma región de la superficie. Usualmente se expresa en días. Es decir, la periodicidad de adquisición de imágenes está en función de las características orbitales de la plataforma del sensor (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura.

Estos cuatro aspectos de la resolución están íntimamente relacionados. A mayor resolución espacial, disminuye habitualmente la temporal, y es previsible que se reduzca también la espectral y la radiométrica (Chuvienco, 2001).

8. Interpretación visual de imágenes²⁶

La forma más intuitiva de extraer información de imágenes de satélite es mediante la interpretación visual, que está basada en la habilidad que presentan los humanos para relacionar tonos, colores y patrones espaciales que aparecen en una imagen con elementos del mundo real.

En una imagen de satélite (también en fotografías aéreas) se ven varios objetos de diferentes tamaños y formas, algunos de ellos se identifican correctamente mientras que otros no, dependiendo de las percepciones individuales y de la experiencia del intérprete. Cuando podemos identificar lo que vemos en imágenes de satélite y fotografías aéreas, y

²⁶ GARCIA MELENDEZ Eduardo, Análisis Visual de Imágenes, Universidad de León, 2007

comunicar esa información a otros estamos realizando fotointerpretación: los datos en bruto de las imágenes y fotografías cuando son tratados por un cerebro humano se convierten en información. Por lo tanto, el intérprete se puede encontrar con dos situaciones:

1 – Reconocimiento directo y espontáneo de un objeto o fenómeno (porque es conocido por el intérprete).

2 – Utilización de un proceso de razonamiento en el que se utiliza el conocimiento profesional y la experiencia para identificar un objeto. En ocasiones este razonamiento no es suficiente para la interpretación correcta, siendo necesario el trabajo de campo.

Las características básicas para la identificación de elementos en las imágenes son:

- Tono: Se refiere al brillo relativo de los objetos. Las variaciones tonales son elementos muy importantes en la interpretación, constituyendo uno de los principales criterios de interpretación visual.
- Color: La ventaja del color sobre el tono es que el ojo humano es mucho más sensible a las variaciones cromáticas frente a las variaciones de intensidad luminosa.

Así mismo, varios autores han puesto de manifiesto que el ojo humano es más sensible a las variaciones cromáticas que a la intensidad, colocando al color como un elemento básico en la interpretación visual de imágenes.

- **Textura:** Es la aparente rugosidad o suavidad de una región de la imagen; en definitiva, al contraste espacial entre los elementos que la componen (Chuvienco, 2001).
- **Forma:** Se refiere a la forma de los objetos, a la forma de su perímetro, a la forma tal y como se ve en una foto de dos dimensiones, en definitiva, la forma caracteriza a muchos de los objetos que se ven en las imágenes.
- **Tamaño:** El tamaño de los objetos en las imágenes se tiene que considerar siempre en el contexto de la resolución espacial y de la escala en la que está impresa o desplegada la imagen.
- **Patrón:** Se refiere a la distribución espacial de los objetos (tanto naturales como contruidos), a la repetición de formas cada cierto espacio, que permite su identificación.
- **Sombras:** Es la oscuridad en un área o espacio debido a que los rayos de una fuente de energía (generalmente el sol) no llegan a ella por la interposición de un cuerpo opaco que forma parte del terreno, o una construcción.
- **Localización:** Se refiere a la posición topográfica o geográfica en la que se encuentra un objeto o elemento respecto a un marco de referencia (montaña, valle, ciudad, etc.).
- **Aspectos temporales:** Los aspectos temporales relacionados con los fenómenos naturales son de gran importancia en la interpretación porque factores como el crecimiento vegetativo y el contenido en humedad del

suelo varían durante el año. Por otra parte, estos aspectos también son importantes para interpretar los cambios ocurridos en un período de tiempo determinado en cuanto a usos del suelo y repercusiones de las actividades humanas sobre el medio.

9. Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes, es la aplicación de técnicas matemáticas, estadísticas y computacionales, que permiten mejorar, corregir, analizar y extraer información de las imágenes captadas por los sensores a bordo de los satélites.

El procesamiento digital permite realizar operaciones complejas, muy costosas o inaccesibles para el análisis visual. Tiene la ventaja de permitir una rápida comparación de fenómenos multitemporales por la accesibilidad a la información que posee.²⁷ Típicamente implica realizar correcciones de distorsiones geográficas (georreferenciación), correcciones radiométricas y eliminación de ruidos.

9.1 Mejora de imágenes:

Estos procedimientos son aplicados a datos de una imagen con el objetivo de hacer más eficiente el despliegue o registro de datos para una subsecuente interpretación.

²⁷ BASTERRA, I. (n.d. (sin fecha). Teledetección-Imágenes Satelitales-Procesamiento Digital De Imágenes. UNNE.p 33

Usualmente se aplican a capas separadas correspondiente a una banda o canal en especial. Se presentan tres técnicas de mejora de imágenes:

- Manipulación de contraste;
- Manipulación de rasgos espaciales;
- Manipulación de multi-imágenes (o Transformación de imágenes según el College and Career Readiness and Success Center - CCRS): implica el proceso combinado de múltiples bandas de datos espectrales. Se aplican operaciones aritméticas sobre diferentes bandas del sensor, para combinar y transformar las capas de datos originales en nuevas imágenes que logren desplegar o destacar mejor ciertos rasgos de la escena.

9.2 Procesamiento digital de imágenes:

El objetivo principal de estas operaciones es sustituir el análisis visual (clasificación) de imágenes, con técnicas cuantitativas para automatizar la identificación de rasgos en una escena. Normalmente esto implica el análisis de imágenes multiespectrales y la aplicación de reglas de índole estadístico para determinar la identidad de tipo de cobertura de cada pixel en una imagen. Es el proceso de distribuir los pixeles de una imagen en un número finito de clases o categorías de datos, basado en sus valores asociados. Para ser clasificados, cada uno de los pixeles debe satisfacer un criterio determinado. Este proceso también es conocido como segmentación de imágenes (ERDAS, 1997).

El reconocimiento de patrones se considera tanto una ciencia como un arte y consiste en encontrar patrones en los datos que se puedan extraer por medio de una clasificación. Mediante la adecuada mejora espacial y espectral de una imagen, la clasificación se puede realizar con la misma vista. Con el uso de computadoras, la distribución de los píxeles en las clases definidas se debe realizar a partir de criterios estadísticos y matemáticos (ERDAS, 1997). El modo de implementar estos criterios de clasificación para un sistema computadorizado se divide en dos pasos: entrenamiento y clasificación.

9.2.1 Caracterización Estadística de las Imágenes.

Cualquier operación aplicada sobre la imagen parte de su carácter digital. Por tanto, conviene conocer las estadísticas elementales que la definen, para su mejor interpretación y a orientar los posteriores procesos de realce visual o transformación (Chuvieco, 1995).

Para poder cuantificar mejor las características de las imágenes, es necesario conocer algunos parámetros estadísticos, que deben calcularse. Estos cálculos, podemos dividirlos en dos grandes grupos, según las operaciones a realizarse sean para cada banda de la información, o entre las distintas bandas. Algunos de los parámetros estadísticos a los que recurre el procesamiento digital, son: histograma, entropía, valores máximo-mínimo-media, varianza, desviación standard, para cada banda y Coeficiente de correlación para el análisis entre bandas.

De igual manera, el histograma de una imagen es la función que representa la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los niveles de gris (proporcionales a la

radiometría) en una imagen digital. La forma de representación, puede ser en forma numérica o gráfica.

Varios autores han puesto de relieve el interés del histograma para realizar una primera valoración de la imagen (Jensen, 1986, pp 69-72; Richard,1986, pp 84-85). La localización de un histograma nos permite deducir el contraste presente en la imagen, mientras la presencia de picos relativos, puede ser testigo de determinadas clases de coberturas (Chuvienco, 1995).

9.2.2 Pre - procesamiento digital de imágenes.

Consiste en el procesamiento inicial de los datos crudos para corregir las distorsiones radiométricas y geométricas de la imagen y eliminar el ruido.

Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, presenta una serie de alteraciones geométricas y radiométricas debidas a muy variados factores. Esto explica que la imagen finalmente detectada no coincida con el tono –posición – forma – tamaño de los objetos que incluye. Según Bernstein (1978) y Mather (1987), para el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes pueden agruparse en cuatro:

- Distorsiones originadas por la plataforma.
- Distorsiones provocadas por la rotación terrestre.
- Distorsiones provocadas por el sensor.
- Distorsiones provocadas por la atmosfera.

Algunos de estos problemas se solventan rutinariamente en los centros encargados de recepción o venta de las imágenes. Otros, sin embargo, persisten, haciendo necesarias aplicar una serie de técnicas de ajuste.

*9.2.2.1 Corrección Radiométrica.*²⁸

La corrección radiométrica implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeado de la imagen.

- **Píxeles o líneas perdidas:** Si se ha perdido el valor de algún píxel la solución más simple sería estimarlo como la media de los valores del mismo píxel en las líneas anterior y posterior (no es recomendable utilizar los píxeles contiguos de la misma línea por que han sido captados por el mismo detector que ha dado el fallo, por tanto, son poco fiables).

No hay que olvidar sin embargo que las diferentes bandas de una imagen están altamente correlacionadas y además los detectores de dos bandas diferentes no son los mismos. Por tanto, podría utilizarse el valor del píxel faltante en una banda diferente para mejorar la estimación:

Para detectar líneas perdidas se compara la media de los niveles digitales de una línea con las medias de las líneas anterior y posterior, para detectar píxeles perdidos se

²⁸UNIVERSIDAD DE MURCIA. Fotointerpretación y Teledetección. Pág 1 . n.d. (no date [sin fecha]).
Página web de la universidad de Murcia. <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf>

compara el valor de un píxel con los de los 8 píxeles vecinos mediante algún procedimiento de filtrado.

- **Bandeado:** El fenómeno del bandeo se debe a una mala calibración entre detectores y resulta especialmente visible en las zonas de baja radiancia (zonas marinas, por ejemplo). El resultado es la aparición periódica de una banda más clara u oscura que las demás. Para corregir el bandeo se asume que, en caso de no haber error, los histogramas obtenidos por cada uno de los detectores serían similares entre sí y similares al histograma global de la imagen que se toma como referencia.

En primer lugar, se calculan los coeficientes a_k y b_k para una corrección lineal de cada uno de los detectores.

$$b_k = s / s_k$$

$$a_k = m - b_k m_k$$

Donde m y s son la media y la desviación típica del conjunto de píxeles de la imagen y m_k y s_k la media y la desviación típica de los píxeles obtenidos por el detector k .

A continuación, los ND de la imagen se recalculan como:

$$ND'_{ij} = a_k + b_k ND_{ij}$$

Asumiendo que la línea i ha sido captada por el detector k

9.2.2.2 Georreferenciación y Corrección Geométrica²⁹

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes. El proceso de georreferenciación consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estándar para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno de los Sistemas de información geográfica-SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud. En caso de que la imagen no hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo, sin embargo, una imagen puede sufrir diversos tipos de distorsiones.

Las correcciones necesarias para transformar en cada punto de la imagen sus coordenadas arbitrarias (fila-columna) en coordenadas reales (X e Y a UTM por ejemplo) se explicitan mediante un par de ecuaciones que hacen corresponder a cada pixel par (f, c) un par (X, Y).

²⁹ UNIVERSIDAD DE MURCIA. Fotointerpretación y Teledetección. Pág 81 . n.d. (no date [sin fecha]). Página web de la universidad de Murcia. <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf>

$$X = f_1(f,c)$$

$$Y = f_2(f,c)$$

La forma y parámetros de estas funciones dependen fundamentalmente del tipo de enfoque que se escoja para realizar la georreferenciación. Existen fundamentalmente dos métodos.

El primero, la corrección orbital, modeliza las fuentes de error y su influencia. Para ello es necesario conocer con precisión tanto las características de la órbita del satélite como las del sensor. El segundo es un enfoque empírico que modeliza la distribución de errores en la imagen utilizando puntos de control. El primero es más automático conociendo la información necesaria y las ecuaciones de transformación, aunque falla cuando aparecen errores aleatorios; es el que se suele suministrar cuando los datos se piden georreferenciados. El segundo es más simple en cuanto a su formulación y corrige mejor los errores aleatorios, su inconveniente es que es más trabajoso. El método de los puntos de control no deja de ser un procedimiento de regresión.

En general, en los métodos de regresión se dispone del valor de dos variables, X e Y, medidas en una serie de casos y, a partir de ellos, se obtiene una ecuación que permite estimar Y a partir de nuevos valores de X. A la variable X se le denomina independiente y a Y variable dependiente.

En el caso de la georreferenciación las variables independientes son c y f, es decir la columna y fila en que se ubica un pixel en la imagen original; mientras que X e Y, las coordenadas correspondientes a un sistema estándar, son las dependientes. Lo primero que

hay que decidir es el tipo de ecuaciones que se van a utilizar. Normalmente se trabaja con ecuaciones polinómicas que permiten modificar de forma flexible las coordenadas de la imagen. El orden del polinomio determina la flexibilidad del ajuste y de la transformación, normalmente se emplean transformaciones de tipo lineal (polinomio de grado 1), cuadrático (polinomio de grado 2) o cúbico (polinomio de grado 3). Los casos más habituales son la transformación lineal:

$$X = Ac + Bf + C$$

$$Y = Dc + Ef + F$$

Y la transformación cuadrática

$$X = Ac + Bf + Cc^2 + Df^2 + Ecf + F$$

$$Y = Gc + Hf + Ic^2 + Jc^2 + Kcf + L$$

La transformación cúbica es más compleja, las ecuaciones son similares a las lineales y cuadráticas, pero incluyendo términos elevados al cubo.

Es importante determinar cuál es el tipo de transformación más adecuada en función del tipo de distorsiones que se supone que aparecen en la imagen y de la cantidad y calidad de los puntos de control. Es necesario tener en cuenta que cuanto mayor sea el grado de los polinomios implicados, más sensible será la transformación a errores en la selección de los puntos de control.

Empleando el procedimiento de los mínimos cuadrados, se pueden calcular los valores de los coeficientes A, B, a partir de las coordenadas de un conjunto de puntos de

control. Se trata de puntos en los que se conoce tanto la fila y la columna como las coordenadas reales.

Como regla general, el número de puntos de control debería ser mayor que el número de parámetros que se van a calcular, 6 en la transformación lineal, 12 en la cuadrática y 24 en la cúbica. La transformación lineal es la más sencilla asume que no hay distorsión en la imagen y simplemente se requiere una traslación (coeficientes A y E), cambio de escala (coeficientes B y H) y rotación de la imagen (coeficientes D y G). Por tanto si el origen de coordenadas de la imagen original es $(c = 0, f = 0)$ entonces:

- A=valor de X en el punto en el que $c=0$
- E=valor de Y en el punto en el que $f=0$

Si no es necesario rotar la imagen B y H son factores de escala

$$B = (\max(X) - \min(X)) / (\max(c) - \min(c))$$

$$H = (\max(Y) - \min(Y)) / (\max(f) - \min(f))$$

y, $D = 0, G = 0$.

En caso de que sea necesario rotar la imagen, los valores de B, H, D y G determinan el tipo de rotación.

Casi todos los programas de SIG disponen de algunos procedimientos para realizar una transformación de coordenadas. Resultan además muy útiles para incorporar mapas escaneados.

En general se basan en una serie de etapas básicas:

Se busca una serie de puntos de control (generalmente lugares muy destacados y visibles) y se averiguan las coordenadas de cada uno de ellos en los dos sistemas de coordenadas, (X, Y) y (f, c) . El número de puntos de control debe ser suficiente, mayor cuanto más grande sea la imagen, y mayor cuanto más abrupto sea el relieve.

Los puntos de control deben:

- Estar adecuadamente repartidos por toda la imagen para evitar que las distorsiones locales adquieran demasiado peso en las ecuaciones finales.
 - Ser objetos perfectamente identificables y preferentemente artificiales ya que tienen menor movilidad.
 - Las coordenadas reales pueden obtenerse a partir de un Sistema de posicionamiento Global – GNSS en este caso GPS, mapas en los que puedan identificarse o de otra imagen previamente georreferenciada.
 - Determinación del tipo de transformación más adecuada en función del tipo de datos de partida y del número de puntos de control que hayan podido encontrarse. Normalmente, para imágenes de satélite la opción preferible es una ecuación cuadrática.
- Mediante mínimos cuadrados se obtienen los valores de los coeficientes de regresión A, B, C, D, E, F, \dots estos coeficientes así calculados permiten realizar una modificación del sistema de coordenadas con el mínimo grado

de error. Se obtiene además una estimación del error cuadrático medio (ECM) que resulta muy útil para determinar si es necesario ampliar el número de puntos de control.

La ecuación del RMS es:

$$ECM = ((\sum (X' - X)^2 + (Y' - Y)^2) / n)^{1/2}$$

Donde X1 e Y1 son las coordenadas estimadas por la transformación para cada punto de control y X e Y las coordenadas reales. Como norma general el ECM debería ser inferior al tamaño del pixel. Lógicamente, cada punto de control va a tener su propio error cuadrático:

$$EC = ((X' - X)^2 + (Y' - Y)^2)^{1/2}$$

que permite determinar si existe algún punto erróneo que sea necesario eliminar.

- Se aplican las ecuaciones anteriores, con los valores calculados de los coeficientes, a todas las coordenadas iniciales para obtener así sus nuevos valores en el sistema de referencia final.

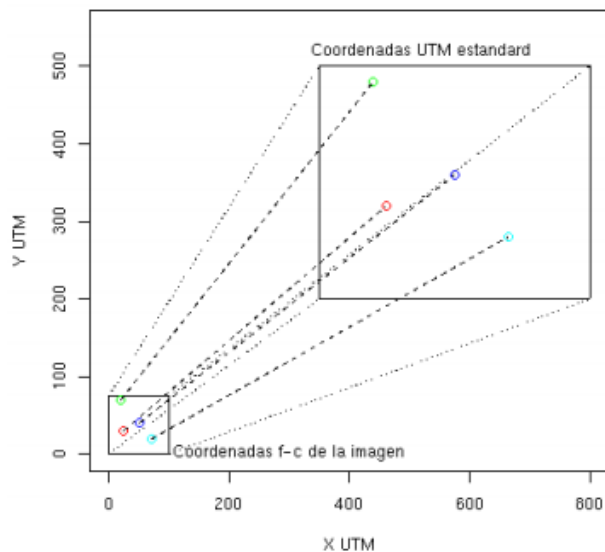


Figura 14. Proceso de georreferenciación.

Fuente: Chuvieco (2001)

Es necesario aplicar un procedimiento para transferir la información de los píxeles originales a los píxeles resultantes del proceso de transformación ya que con estas funciones de transformación va a crearse una nueva matriz correctamente posicionada, pero vacía.

El llenado de esta matriz es, precisamente, el objetivo de la última fase de la transformación de coordenadas. El problema resulta más complejo de lo que pudiera pensarse a primera vista. Idealmente, cada píxel de la capa transformada debería corresponderse a un solo píxel en la original. Lo normal, sin embargo, es que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original (rotación), incluso puede variar el tamaño de los píxeles. El trasvase de valores de la capa original a la transformada puede abordarse por tres métodos dependiendo de la complejidad de la transformación realizada y del tipo de datos.

- Método del vecino más próximo. Sitúa en cada pixel de la imagen corregida el valor del pixel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los valores originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen. Es la más adecuada en caso de variables cualitativas, pero evidentemente, no en teledetección.
- Interpolación bilineal, supone promediar los valores de los cuatro pixeles más cercanos en la capa original. Este promedio se pondera según la distancia del pixel original al corregido, de este modo tienen una mayor influencia aquellos pixeles más cercanos en la capa inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales, pero difumina los contrastes espaciales.
- Convolucion cúbica, se considera los valores de los 16 pixeles más próximos. El efecto visual es más correcto en caso de que se trabaje con imágenes de satélite o fotografías digitalizadas, sin embargo, supone un volumen de cálculo mucho mayor.

Por otro lado, uno de los principales elementos que introducen errores en la georreferenciación son los cambios bruscos de altitud dentro de una imagen. Generalmente puede disponerse de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), es decir una capa raster que contiene en cada celdilla su valor de altitud.

9.2.2.3. Corrección Atmosférica³⁰.

La corrección atmosférica trata de evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre. Por tanto, se va a basar en modelos físicos más complejos que los modelos estadísticos utilizados anteriormente. El primer paso es convertir los Niveles Digitales (ND) almacenados por el sensor en valores de radiancia.

Conversión de los ND a valores de radiancia: Una imagen de satélite en bruto contiene unos valores numéricos denominados niveles digitales (ND) que el satélite obtiene a partir de la energía recibida mediante una ecuación lineal. Para recuperar los valores de energía recibida es necesario aplicar la inversa de esa ecuación lineal.

$$L_{\text{senk}} = a0_k + a1_k \text{ND}_k$$

El término k se refiere a cada una de las bandas del sensor, L_{senk} es la radiación que recibió el sensor.

La radiancia recibida por el sensor no es exactamente la radiancia que procede del suelo. Esta resulta por un lado reducida por la absorción atmosférica y por otra incrementada por la radiancia introducida por la propia atmósfera (dispersión). La ecuación que expresa esta relación es:

³⁰ UNIVERSIDAD DE MURCIA. Fotointerpretación y Teledetección. Pág 86 . n.d. (no date [sin fecha]).
Página web de la universidad de Murcia. <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf>

$$L_{\text{sen},k} = L_{\text{sue},k} T_{k,a} + L_{a,k}$$

Es decir que la radiación que llega al sensor es la procedente del suelo multiplicada por la transmisividad de la atmósfera en camino ascendente más la radiancia aportada por la dispersión atmosférica.

La corrección de la imagen para eliminar el efecto de la atmósfera resulta especialmente necesaria para:

- Calcular determinados índices entre bandas cuya distorsión debida a la atmósfera es diferente.
- Calcular variables deducibles directamente de la radiancia mediante modelos de tipo físico.
- Estudios temporales, ya que la distorsión atmosférica cambia de unos días a otros.

Esta variabilidad de la temperatura es una de las causas por las que la radiación atmosférica resulta compleja ya que se necesitan datos de la atmósfera en el día que se toma la imagen.

El primer paso para la corrección atmosférica es la estimación de $L_{a,k}$. Existen dos métodos relativamente sencillos:

- Mínimo del histograma. Consiste en localizar en la imagen áreas con reflectancia cercana a cero en el infrarrojo (superficies de agua limpia y profunda). Si se representa el histograma de esta banda, los valores mínimos aparecerán próximos a 0, este límite inferior aumenta conforme disminuye la

longitud de onda. Estos valores mínimos del histograma para las diferentes bandas (k) son una buena aproximación a $L_{a,k}$ y por tanto se substraen a los valores originales para obtener una mejor estimación de $L_{sue,k}$.

En el caso de landsat, las bandas 5 y 7 no suelen corregirse puesto que sus valores de $L_{a,k}$ son despreciables.

- Regresión. Se hace un análisis de regresión de TM1, TM2 y TM3 respecto a TM4 para obtener los parámetros de las siguientes ecuaciones:

$$TM_1 = a_1 TM_4 + b_1$$

$$TM_2 = a_2 TM_4 + b_2$$

$$TM_3 = a_3 TM_4 + b_3$$

y utilizando b_k como estimación de $L_{a,k}$. Los valores de transmisividad pueden evaluarse a partir de la ecuación

$$\tau_{k,a} = e^{-\tau_k / \cos \theta_0}$$

donde θ_0 es el ángulo de observación, los valores de τ_k son reportados por la empresa que captura la imagen.

9.2.3 Tratamiento digital de imágenes³¹.

Procesar y/o mejorar digitalmente una imagen, consiste en ejecutar un procesamiento numérico para realzar, enfatizar o suprimir, ciertas características de la misma. Por ejemplo, puede desearse un mayor contraste entre los objetos que integran la imagen, necesitar poner énfasis en los límites de distintas coberturas vegetales, entre otras. Algunas de las técnicas de procesamiento son:

- **Mejoramiento del contraste:** Este procedimiento, consiste en realzar el contraste visual de la imagen. Esto significa que, si tenemos una imagen con histograma estrecho, se busca ensancharlo. Esto se logra, mediante la aplicación de funciones de transformación, que pueden ser: expansión lineal del histograma y ecualización (donde se busca una distribución más uniforme de los valores de píxeles de la imagen).
- **Segmentación:** Esta técnica, permite una primera interpretación de la imagen, lo que trae como consecuencia la obtención de un primer mapa temático. Consiste en establecer rangos en el histograma y asignarles un color a todos los píxeles correspondientes a ese rango.

³¹ BASTERRA Indiana, Teledetección-Imágenes Satelitales-Procesamiento Digital de Imágenes, Departamento de Geociencias, Facultad De Ingeniería – UNNE, 2011.

- Filtraje o convolución: Un filtro espacial, tiene como función, transformar el valor del pixel (pasar de nivel digital a nivel visual), para un fin determinado, teniendo en cuenta los valores de los pixeles vecinos al mismo. Para ello, se coloca sobre el pixel y su entorno, una matriz de coeficientes y se calcula su nuevo valor. Los tipos de filtros, son:

- Suavización: Suavizan o reducen los valores de grises. Sirve para resaltar zonas homogéneas. Son denominados pasa bajo.

- Mejoramiento: Realzan detalles geométricos y altas frecuencias. Definen contornos. Son denominados pasa alto.

- Detección de bordes: Resaltan cambios fuertes en los valores de pixeles. Enfatizan bordes.

- Detección de líneas: Resaltan cambios geométricos en una dirección determinada.

- Operaciones entre bandas: Son procesos aplicados a las imágenes, mediante los cuales, obtenemos imágenes resultantes de realizar operaciones matemáticas pixel a pixel entre los distintos valores en las distintas bandas. El resultado es una nueva banda con el mismo tamaño y estructura de la imagen original, pero con sus valores que no responden ya, a la radiancia obtenida por el sensor sino a los provenientes de la operación aplicada. Una de las operaciones más utilizadas son los denominados índices.

El índice de vegetación por ejemplo es la operación entre bandas más común y consiste en identificar el notable contraste de reflectividad en la vegetación sana que existe entre la zona del infrarrojo cercano y la zona del rojo. El índice de vegetación, es un valor que se obtiene de aplicar operaciones entre dos bandas, según se observa en la fórmula, y que permite obtener una probabilidad de encontrar vegetación en la imagen.

$$Iv = (B_{ir} - B_r) / (B_{ir} + B_r)$$

Dónde: B_{ir} = valor del pixel en la banda infrarroja

B_r = valor del pixel en banda visible rojo

$Iv = 0$ indica escasa probabilidad de encontrar vegetación

$Iv = 1$ indica mucha probabilidad de encontrar vegetación

Composición a color: Es un proceso mediante el cual, se asigna a tres bandas de una imagen, uno de los colores primarios del monitor R G B (red, green, blue) de manera tal, que se los superpone y se visualizan simultáneamente las tres bandas en pantalla. Cada valor de pixel, en cada banda, intervendrá con el porcentaje que le corresponde por su reflectancia original.

Una de las composiciones en color más utilizadas es la denominada Composición Falso Color Standard, que se obtiene desplazando la representación de las bandas hacia el infrarrojo. Es decir, a la banda del verde, se le asigna el color azul, a la banda del rojo, se le asigna el color verde y a la banda del infrarrojo se le asigna el color rojo.

9.2.4 Clasificación de imágenes³².

La clasificación es un concepto del procesamiento digital de imágenes, que contempla los procedimientos mediante los cuales una computadora puede agrupar los píxeles de una imagen, en categorías o clases, dentro de un espacio multiespectral.

La clasificación digital, sigue un procedimiento similar a la fotointerpretación visual: se identifican primeramente las coberturas según tono, textura, forma, modelos, etc. Y luego se expande al resto de la imagen el modelo o patrón determinado. Es decir, se asigna determinada categoría a determinada superficie en función del patrón establecido. Si se traduce esto a un análisis digital, se obtiene el esquema de la clasificación digital, que comprende las siguientes fases (Chuvieco, 2001).

- Definición digital de las categorías: fase de entrenamiento.
- Asignación de los píxeles de toda la imagen a una de esas categorías: fase de asignación
- Comprobación y verificación de resultados
- Corrección de errores.

³² BASTERRA Indiana, Teledetección-Imágenes Satelitales-Procesamiento Digital de Imágenes, Departamento de Geociencias, Facultad De Ingeniería – UNNE, 2011.

La fase de entrenamiento, es la que define digitalmente las categorías temáticas a efectos de que posteriormente, el software las reconozca automáticamente. Según se realice esta fase de entrenamiento, es que se dividen las clasificaciones en dos métodos: el supervisado y el no supervisado. En el primero, se parte de un conocimiento previo del terreno en cambio en el segundo, es el software quien delimita las clases, en función de su homogeneidad.

Existen tres métodos de clasificación digital de imágenes, los cuales son:

9.2.4.1 Clasificación Supervisada.

De acuerdo a Chuvieco³³ (2010), el método supervisado parte de un conocimiento previo" del terreno, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías. Por su parte, el método no supervisado procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen. Queda al usuario, en este caso, la labor de encontrar correspondencias entre esos grupos y sus categorías de interés. Volviendo al paralelismo con la fotointerpretación, podríamos afirmar que en ésta el método supervisado es el más habitual, por cuanto se identifican sobre unos fotogra-mas-tipo las características de cada clase, para luego delimitar, en el resto, las zonas que se ajustan a esas características.

En este método, los aspectos principales a tener en cuenta son:

³³ CHUVIECO, E. (2010) Fundamentos de Teledetección. Madrid P. 377

- Adoptar un esquema de clasificación ordenado.
- Seleccionar áreas de entrenamiento: conviene tener en cuenta algunos criterios habituales en este tipo de técnicas para elegir el tamaño y la distribución más idónea de la muestra, así como para realizar estimaciones a partir de ella. En cuanto al tamaño, se requiere seleccionar un mínimo de $m + 1$ píxeles por categoría, siendo m el número de bandas que integran el análisis. Conviene, no obstante, superar con creces este límite mínimo. Diversos autores recomiendan seleccionar un número de píxeles comprendido entre 10 m y 100 m por categoría. Este número parece fácilmente accesible con los sensores que habitualmente han servido de entrada en la clasificación, pero puede ser más complicado si se parte de equipos hiperespectrales, en donde el número de bandas de entrada sea muy numeroso. Esto sugiere, de nuevo, el interés por seleccionar adecuadamente las bandas más convenientes para la clasificación.
- Por otro lado, ese número mínimo de píxeles se relaciona estrechamente con el grado de asociación espacial entre los ND de la imagen. El muestreo convencional considera que las muestras seleccionadas son aleatorias e independientes.
- Extraer estadísticas de los datos espectrales del área de entrenamiento.
- Analizar las estadísticas para seleccionar los datos que ofrezcan mayor ventaja (bandas) en el proceso de clasificación.

- Seleccionar el algoritmo de clasificación adecuado:
- ✓ Paralelepípedos: realiza clasificaciones supervisadas de imágenes de satélite mediante la técnica de paralelepípedos, a partir de la información contenida en una serie de archivos de firmas espectrales. Se basa en una serie de umbrales bajos y altos de reflectividad para cada categoría en cada banda, determinadas por la firma espectral. Para asignar un píxel a una clase determinada, éste debe poseer valores de reflectividad dentro del rango de la categoría en cuestión en cada banda considerada. El proceso de paralelepípedos es el más rápido de los clasificadores supervisados. También, potencialmente, el menos preciso
- ✓ Mínima Distancia: La clasificación de Mínima Distancia a las Medias se basa en la reflectividad media en cada banda para una firma espectral. Los píxeles se asignan a la clase con la media más próxima a su valor. Es más lento que el clasificador de paralelepípedos, y más rápido que el clasificador de máxima probabilidad. Se utiliza, generalmente, cuando el número de píxeles que define las firmas espectrales es muy pequeño o cuando los campos de entrenamiento no están bien definidos.
- ✓ Máxima verosimilitud: realiza la clasificación por Máxima Probabilidad, a partir de la información contenida en una serie de archivos de firmas espectrales. Se basa en la función de densidad de probabilidad asociada a la firma de un determinado campo de entrenamiento. Los píxeles se asignan a

la clase más probable, tras comparar la probabilidad de que cada píxel pertenezca a cada una de las firmas consideradas.

- Clasificar la imagen en n clases.
- Evaluar estadísticamente la clasificación.
- Comprobación "in situ" de los resultados de la clasificación o corroboración.
- Corrección de errores.
- Clasificación Supervisada

9.2.4.2 Clasificación No Supervisada.

Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados.

En esta estrategia se asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (clusters), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés. Desgraciadamente, como se vio más arriba, estas categorías espectrales no siempre pueden equipararse a las clases informacionales que el usuario pretende deducir, por lo que resta a éste interpretar el significado temático de esas categorías espectrales.

El método para definir los agrupamientos espectrales es muy similar al empleado en otras técnicas de clasificación automática de datos. Se basa en la selección de tres

parámetros: 1) variables que intervienen en el análisis; 2) criterio para medir la similitud o distancia entre casos, y 3) criterio para agrupar los casos similares.

En este método los aspectos principales a tener en cuenta son:

- Visualizar la imagen: es decir, la representación pictórica de los datos sin analizar. Luego: a- Valorar los datos y su calidad. b- Determinar el porcentaje y cobertura de nubes. c- Seleccionar ventanas (áreas de la imagen a trabajar) d- Seleccionar muestras representativas dentro de un área de interés para determinar clases espectrales que se usarán en el entrenamiento al clasificador.
- Definir clases espectrales o entrenamiento: Proceso mediante el cual se instruye a la computadora sobre cómo y cuándo tomar ciertas decisiones. Se basa en parámetros estadísticos y algoritmos de agrupamiento.
- Clasificar el área de estudio: El clasificador es un algoritmo que toma decisiones para asignar o no, un pixel a determinada clase. En esta etapa, la computadora realiza prácticamente sola el trabajo.
- Representación pictórica y tabular de la clasificación: a- Productos gráficos. b- Tablas estadísticas. c- Análisis de datos digitales.
- Evaluación de resultados: Es necesario determinar la exactitud y confiabilidad. El análisis numérico evalúa cuantitativamente el grado de exactitud de una clasificación multiespectral.

Un método no supervisado, puede ser un excelente paso previo para encarar un trabajo de campo que concluye en una clasificación supervisada.

9.3 Sistemas de Clasificación de la cobertura de la tierra

La clasificación es una representación abstracta de la situación real en campo utilizando criterios de diagnóstico bien definidos. Una clasificación describe el esquema sistemático con los nombres de las clases y los criterios utilizados para distinguirlos, y la relación entre clases. Por lo que la clasificación requiere la definición de límites de clase, los cuales deben ser claros, precisos, en lo posible cuantitativos, y basados en criterios objetivos³⁴.

Muchos de los sistemas actuales de clasificación no son aptos para propósitos de "mapeo" y propósitos de monitoreo subsiguientes. El uso de este tipo de criterios de diagnóstico y su arreglo jerárquico para formar una clase está muchas veces en conflicto con la habilidad de definir un límite claro entre dos clases. Con fines de monitoreo, los cambios de cobertura de la tierra toman dos formas: la conversión de una categoría a otra (ej. de bosque a pastura), y modificación de condiciones dentro de una categoría (Ej. de área agrícola a área agrícola intensiva).

Actualmente existen numerosos sistemas de clasificación, entre los que tenemos:

³⁴ FAO, Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra, 2005, página 5.

- Corine Land Cover (Coordinación de Información sobre el Medioambiente)³⁵: La metodología Corine Land Cover se adoptó en Colombia en el marco del programa de apoyo y la colaboración prestada por el Fondo Francés para el Medio Ambiente (FFEM), la Embajada de Francia en Colombia, el Instituto Geográfico Nacional de Francia (ING) y ONF Andina Colombia, con el fin de promover una metodología unificada y estandarizada para el contexto colombiano en relación a coberturas de la tierra.
- Corine Land Cover en Europa viene desarrollándose desde 1990, definiendo una metodología específica para realizar el inventario de coberturas de la tierra, constituyéndose en soporte para la toma de decisiones en políticas relacionadas con el medio ambiente y el ordenamiento territorial; aplicándose hoy en día en la totalidad del territorio europeo.

La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a escala 1:100.000. Como principal

³⁵ Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC-, Revisado el 17 de octubre de 2015. Consultado en: www.siac.gov.co.

resultado el país cuenta con la "Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia".

- Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra (LCCS)³⁶: Ante la ausencia de un sistema aplicable o ampliamente aceptado para clasificar la cobertura de la tierra, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) y el y el Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (UNEP) desarrollaron el Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra (LCCS), el cual facilita la comparación de clases de cobertura de la tierra sin importar la escala de mapeo, el tipo de cobertura, el método de recolección de datos o la ubicación geográfica.

Actualmente, LCCS es el único sistema de clasificación universalmente aplicable que se encuentra en uso. La flexibilidad inherente del sistema LCCS, su aplicabilidad en todas las zonas climáticas y condiciones medioambientales, y su compatibilidad con otros sistemas de clasificación han dado al sistema LCCS la potencialidad de ser aceptado como el estándar internacional.

³⁶ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), www.fao.org.

9.4 Análisis Multitemporal

Una de las aportaciones más destacadas de la teledetección espacial al estudio del ambiente es su capacidad para seguir procesos dinámicos. Al tratarse de información adquirida por un sensor situado en una órbita estable y repetitiva, las imágenes de satélite constituyen una fuente valiosísima para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre, ya sean debido al ciclo estacional de las cubiertas y a catástrofes naturales o a alteraciones de origen humano (Chuvieco, 2001).

La detección de cambios en el paisaje se refiere a la identificación de diferencias en el estado de éste observado en dos tiempos diferentes, siendo el punto inicial para comprender los factores y procesos de los cambios en la superficie de la tierra. Un acercamiento a los sucesos de transformación del paisaje por medio del análisis del cambio en el uso y cobertura del suelo, incluye la descripción de cuáles coberturas han cambiado, cuándo y dónde han ocurrido dichos cambios. Al conocer los patrones espaciales y temporales de cambio en el paisaje, es posible integrarlos con variables ambientales y socioeconómicas que den una idea sobre la evolución del mismo, sus tendencias y estimación de escenarios futuros (Koomen y Stillwell, 2007; Turner et al., 2007; Sui et al., 2008; Long et al., 2009). Es decir, los estudios de detección de cambios tienen por objeto analizar que rasgos presentes en un determinado territorio se han modificado entre dos o más fechas.

Se identifican dos grandes metodologías para el análisis de cambios, el análisis bitemporal y el uso de trayectorias de tiempo o series de tiempo. El método bi-temporal incluye los algoritmos de detección que están referidos a aproximaciones directas entre las

distintas fuentes (comparación directa), comparaciones post-análisis desde imágenes clasificadas y la integración de todos los datos en un modelo. En cuanto a la metodología de trayectorias de tiempo, el análisis dispone de series de tiempo para identificar tendencias del cambio (Sui et al., 2008).

Para la estimación y modelación de los cambios en las coberturas vegetales y usos del suelo, la metodología más empleada es la comparación bi-temporal de imágenes clasificadas en diferentes categorías. Esta metodología permite saber si el paisaje está cambiando y qué está cambiando, no requiere pre-procesos complejos, por otra parte la precisión de la detección del cambio va a estar sujeta a la calidad del proceso de clasificación (Sui et al., 2008).

Existen dos grupos de técnicas que pueden abordarse para la detección de cambios:

- Comparar imágenes previamente clasificadas: y,
- Clasificar conjuntamente las imágenes de las dos fechas.

En el primer caso se aborda una clasificación para cada imagen por separado, cuidando de emplear la misma leyenda temática, y si es posible la misma resolución espacial, así como similares características espectrales en las imágenes satelitales de las dos fechas, con objeto de que puedan compararse posteriormente. A continuación, se genera una tabla multitemporal de cambios, en donde se presentan las transiciones que se producen entre las dos fechas.

En el segundo caso se considera la asignación conjunta de las dos fechas.

En este caso la clasificación resultante estará formada por categorías multitemporal, definidas por su estabilidad o por su cambio entre las dos imágenes que se consideren.

9.5 Constelación Landsat³⁷

LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite) fue el primer satélite enviado por los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. Inicialmente se le llamó ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) y posteriormente los restantes recibieron el nombre de LANDSAT. La constelación LANDSAT está formada por 7 satélites que provenían, tanto conceptual como estructuralmente, de los satélites para fines meteorológicos Nimbus. Llevaron a bordo diferentes instrumentos, siempre con la filosofía de captar mayor información de la superficie terrestre, con mayor precisión y a mayor detalle, de ahí sus mejoras radiométricas, geométricas y espaciales. La fecha de lanzamiento del primer satélite LANDSAT fue en 1972.

Los tres primeros satélites LANDSAT fueron construidos a partir de una modificación del satélite meteorológico NIMBUS. Tenían una órbita circular, casi polar, sincrónica con el Sol, a una altura aproximada de 920 Km. Los satélites realizaban una órbita completa alrededor de la Tierra cada 103 minutos y 27 segundos, cubriendo 14 fajas

³⁷ INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, México.

de la superficie terrestre por día, entre los años 1972 al año 1983 fecha en que se desactivó el satélite LANDSAT 3.

Cada 18 días ellos pasaban sobre la misma región de la superficie de la Tierra. El horario de paso de los satélites por el Ecuador era a las 09:30 horario local. Cada satélite se constituía por un sistema de cámaras de televisión (tres en ERTS-1 y LANDSAT-2 y dos en el LANDSAT-3), mismas que observaban y registraban una escena, de 185 Km, en forma instantánea. Los sensores a bordo de estos satélites eran RVB en LANDSAT 1 y 2, y MSS en LANDSAT 2 y 3.

Operaba en la faja del espectro electromagnético comprendida entre el visible y el infrarrojo cercano. La resolución espacial en el ERTS-1 y LANDSAT-2 era de 80x80 m, con tres bandas espectrales (verde, rojo e infrarrojo cercano). En LANDSAT 3 era de 40x40 m, con una banda espectral (pancromático).

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
Multiespectral	79	Banda 4 azul:	0.50 - 0.60	8 BITS	18 Días
		Banda 5 verde:	0.60 - 0.70		
		Banda 6 roja:	0.70 - 0.80		
		Banda 7 Infrarrojo cercano 1:	0.80 - 1.1		

Figura 15. Características técnicas LANDSAT 1, 2 y 3

Fuente: INEGI – Dirección General de Geografía y Medio Ambiente

Los Landsat 4 y 5 sufrieron algunas modificaciones tanto en la forma de la plataforma como en sus características orbitales. La altitud fue modificada de 920 Km a 705 Km; el tiempo de revisita pasó de 18 a 16 días y el período orbital pasó de 103 minutos a 98,9 minutos. El horario de pase por el Ecuador continuó siendo a las 9:30 A.M. horario local. El satélite LANDSAT 4 fue lanzado en el año 1982 y el LANDSAT 5 fue lanzado en 1984 con funcionamiento hasta el año 2013.

El sensor MSS fue colocado a bordo de LANDSAT- 4 por insistencia de los investigadores del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, quienes querían un sistema multiespectral para estudios agrícolas. Se trata de un barredor óptico electrónico, que opera en cuatro canales del espectro electromagnético, dos en el visible (4 y 5) y dos en el infrarrojo cercano (6 y 7). Una escena terrestre observada por este sensor representaba un área de 185 Km y la resolución espacial era de 80 x 80 m.

El sensor TM es un avanzado sensor de barrido multiespectral, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS.

Operaba simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo termal. La escena terrestre registrada por este sensor es también de 185 km.

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
Multiespectral	30	Banda 1 azul:	0.45 - 0.52	8 BITS	16 Días
		Banda 2 verde:	0.52 - 0.60		
		Banda 3 roja:	0.63 - 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano1:	0.76 - 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano2:	1.55 -1.75		
		Banda 7 Infrarrojo medio:	2.08 - 2.35		
Termal	120	Banda 6 Infrarrojo térmico:	10.4 - 12.5		

Figura 16 . Características técnicas LANDSAT 5

Fuente: INEGI – Dirección General de Geografía y Medio Ambiente

Landsat-7 fue diseñado para una vida útil de 5 años y tiene la capacidad de recolectar, así como transmitir hasta 532 imágenes por día. Se encuentra en una órbita Heliosincrónica, que significa que pasa siempre a la misma hora por un determinado lugar.

Tiene visión de toda la superficie terrestre en un lapso de tiempo de 15 días, y realiza 232 órbitas. El peso del satélite es de 1973 Kilogramos, mide 4.04 metros de largo, y 2.74 metros en diámetro. A diferencia de sus antecesores, Landsat 7 posee una capacidad de almacenamiento de 378 gigabytes, equivalente alrededor a 100 imágenes. El instrumento esencial a bordo del satélite es el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), fue lanzado en 1999.

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
Pancromática	15	Banda 8. Pancromática	0.52 - 0.90	8 BITS	16 Días
Multiespectral	30	Banda 1. Azul	0.45 - 0.52		
		Banda 2. Verde	0.53 - 0.61		
		Banda 3. Roja	0.63 - 0.69		
		Banda 4. Infrarrojo cercano1	0.78 - 0.90		
		Banda 5. Infrarrojo cercano2	1.55 - 1.75		
		Banda 6. Infrarrojo medio	2.09 - 2.35		

Figura 17. Características técnicas LANDSAT 7

Fuente: INEGI – Dirección General de Geografía y Medio Ambiente

El satélite Landsat 8³⁸ lanzado en el año 2013 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM+, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como

³⁸ SERVICIO GEOLOGICO DE ESTADOS UNIDOS, USGS, www.usgs.gov/landsat.usgs.gov/landsat8.php

las nubes, agua y nieve.

Procesamiento:	Nivel 1 T-Corrección geométrica
Tamaño de píxel:	Bandas OLI multiespectrales 1-7,9: 30-metros Banda OLI pancromática 8: 15-metros Bandas TIRS 10-11: tomadas en 100 metros, pero remuestreadas a 30 metros para que coincida con las bandas multiespectrales de OLI
Características de los datos:	<ul style="list-style-type: none"> • Formato de datos GeoTIFF • Remuestreo por convolución cúbica (CC) • Norte arriba (MAP) de orientación • Proyección cartográfica: Universal Transversal Mercator (UTM) (estereográfica polar de la Antártida) • Datum al Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84 • 12 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para OLI • 41 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para TIRS • Los valores de píxel en 16 bits
Entrega de datos:	Archivo comprimido .Tar.gz y de descarga a través de HTTP
Tamaño de archivo:	Aproximadamente 1 GB (comprimido), aproximadamente 2 GB (sin comprimir)

Figura 18. Especificaciones Productos LDCM a Nivel 1

Fuente: USGS, 2013

Nº Banda	Descripción	Ancho de banda (nm)	Centro Tolerancia (\pm nm)	Mínimo inferior (nm)	Máximo superior (nm)
1	Aerosol costero	443	2	433	453
2	Azul	482	5	450	515
3	Verde	562	5	525	600
4	Rojo	655	5	630	680
5	NIR	865	5	845	885
6	SWIR1	1610	10	1560	1660
7	SWIR2*	2200	10	2100	2300
8	Pancromático	590	10	500	680
9	Cirrus	1375	5	1360	1390

Figura 19. Rangos Espectrales del Sensor OLI

Fuente: USGS, 2013

Una gran ventaja es que las imágenes son distribuidas de manera gratuita desde mayo de 2013 por la USGS (en su sitio <http://earthexplorer.usgs.gov/>). Actualmente la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) se encuentra en una etapa de ajustes para la distribución de la misma información. Los archivos se distribuyen comprimidos y su tamaño es de aproximadamente 1 GB; cada escena es de 170 por 185 kilómetros con 9 bandas en resolución espacial de 30 metros, una banda pancromática de 15 metros y dos bandas en el infrarrojo térmico de 100 metros de tamaño de pixel.

9.6 Radarsat³⁹

RADARSAT es un radar de Abertura Sintética (SAR), el cual envía sus propias señales de microondas a la Tierra y procesa las señales que recibe de regreso. Al ser un sensor activo, la longitud de onda más larga de RADARSAT es más adecuada para penetración atmosférica y puede coleccionar datos sin tener en cuenta las condiciones atmosféricas de la Tierra. Esta habilidad ofrece al usuario significativas ventajas cuando se trata de ver bajo condiciones que impiden observaciones hechas por aviones o satélites ópticos.

RADARSAT, es un satélite de observación lanzado el 4 de noviembre de 1995 por un cohete delta II y fue el resultado de un consorcio entre el Gobierno Canadiense, la industria privada y la NASA. Al ser el primer satélite canadiense de observación de la Tierra, y el primero en el mundo de sensor de radar orientado operacionalmente,

³⁹ AGENCIA ESPACIAL CANADIENSE, CSA, www.asc-gc.ca.

RADARSAT está proporcionando información valiosa para usar en el monitoreo del medioambiente y de los recursos naturales del mundo.

RADARSAT se lanzó en una órbita sincrónica al sol, amanecer - atardecer con un ciclo repetitivo de 24 días. El satélite proporciona oportunidades de imagen regulares con frecuencia diaria sobre el Ártico, y de cada cinco días sobre latitudes ecuatoriales.

El satélite RADARSAT-1 recoge imágenes radar desde 1995 (adquisiciones en banda C), y RADARSAT-2 desde 2007. Sus principales aplicaciones las encontramos en: geología (exploración minera y petrolera), en cartografía (producción de), en defensa (cartografía y observación), en gestión de riesgos (control de inundaciones), en agricultura y forestación, como en vigilancia marítima (detección de derrames de hidrocarburos, vigilancia de los hielos para la navegación y detección de buques).

RADARSAT está equipado con siete modos de haz, que posibilitan obtener imágenes con resoluciones que van desde los 8 hasta los 100 metros. El haz puede direccionarse en ángulos desde 10 a 60 grados, barriendo áreas cuyo ancho va desde 50 a 500 km. Esto permite obtener mapas a escalas de 1:1.000.000 a 1:50.000.

RADARSAT (Características técnicas)				
Bandas espectrales	5,6 cm (C-band)			
Modo	Ancho de barrido	Rango resolución x Azimut	Región angular	Polarización
<i>Fine</i>	50 Km	8 x 8 m	30° - 50°	HH y HV o VH y VV
<i>Standard</i>	100 Km	25 x 26 m	20° - 49°	
<i>Wide</i>	150 Km	30 x 26 m	20° - 45°	
<i>ScanSAR Narrow</i>	300 Km	50 x 50 m	20° - 49°	
<i>ScanSAR Wide</i>	500 Km	100 x 100 m	20° - 46°	HH
<i>Extended Low</i>	170 Km	40 x 26 m	10° - 23°	
<i>Extended High</i>	75 Km	18 x 26 m	49° - 60°	HH, VV, HV, VH
<i>Fine Quad-pol</i>	25 Km	12 x 8 m	20° - 41°	
<i>Standard Quad-pol</i>	25 Km	25 x 8 m	20° - 41°	Una de: HH/HV/VH/VV
<i>Ultra-Fine</i>	20 Km	3 x 3 m	30° - 40°	
Formato de entrega	CEOS, GeoTIFF			
Revisita	De 2-3 días en ecuador dentro de 500 Km de ancho de barrido, dependiendo del modo.			
Lanzamiento	Diciembre 2007			

Figura 20. Características de Radarsat 2

Fuente: Agencia Espacial Canadiense.2007

10. Indicadores e Índices

Los indicadores están constituidos por la combinación de dos o más datos y son convertidos en un índice mediante una función matemática que los sintetiza (EEE/AMAE, 2002).

Según la Real Academia de la Lengua Española, un indicador es la medida cuantitativa o la observación cualitativa que permite identificar cambios en el tiempo y cuyo propósito es determinar qué tan bien está funcionando un sistema, dando la voz de

alerta sobre la existencia de un problema y permitiendo tomar medidas para solucionarlo, una vez se tenga claridad sobre las causas que lo generaron.

En este sentido, los indicadores se convierten en uno de los elementos centrales de un sistema de referenciación, ya que permiten, dada su naturaleza, la comparación al interior de la organización (referenciación interno) o al exterior de la misma (referenciación externo colectiva).

Sin embargo, para que un indicador cumpla este objetivo de manera efectiva, debe poseer, entre otras, las siguientes características:

- Relevante: debe ser importante o clave para los propósitos que se buscan.
Entendible: no debe dar lugar a ambigüedades o malinterpretaciones que puedan desvirtuar su análisis.
- Basado en información confiable: la precisión del indicador debe ser suficiente para tomar la decisión adecuada.
- Transparente/verificable: su cálculo debe estar adecuadamente soportado y ser documentado para su seguimiento y trazabilidad.
- Basado en información específica con relación al lugar y el tiempo: debe ser asociado a hechos reales que faciliten su análisis.

En relación a los índices que reflejen la calidad ambiental, Santana Rodríguez et al (2010), usa datos provenientes únicamente de sensores remotos (imágenes Landsat ETM+) y obtiene cinco indicadores ambientales (temperatura de superficie (TS), y los índices de

vegetación normalizado (NDVI), de humedad en las hojas (LWCI), de suelos normalizado (NSI) y de vegetación ajustado al suelo (SAVI), para estimar un Índice de Calidad Ambiental (ICA). Así mismo, Escobar (2006) propone un modelo de índice para grandes zonas urbanas, utilizando información de imágenes satelitales y también de censos, y plantea la necesidad de incorporar información de múltiples fuentes para generar sistemas de indicadores e índices más completos.

La construcción de índices demanda la síntesis de información que en muchas ocasiones no está disponible. Generalmente, el índice construido no da explicación de todos los factores que pueden describir una variable latente (es decir, una variable no observada directamente, inferida a partir de otras observadas), sin embargo, son en todo momento una aproximación a ella (Escobar op cit).

Para el presente estudio, se tomaron las ecuaciones para calcular el Índice de Incidencia Antrópica referenciados en el documento Análisis Espacio-Temporal De Un Índice De Incidencia Antrópica En La Cuenca La Matanza Riachuelo, Provincia De Buenos Aires realizado por Karina Paola Quaní de la Universidad de Córdoba Argentina.

10.1 Indicador Demográfico

Los indicadores demográficos es toda información de la que se dispone para conocer la cantidad de población que hay en un lugar. Se obtiene de la Natalidad (Tasa bruta de natalidad), Mortalidad (TBMort.), Migraciones (emigraciones e inmigraciones), aunque existen otros que afectan de manera indirecta, como por ejemplo la tasa de fecundidad, etc. Esta información en Colombia se encuentra a cargo del DANE, entidad que tiene registros históricos desde 1985.

Para el presente trabajo, se determinará el indicador demográfico con base a la siguiente formula:

$$ID = N / Kp$$

N = tamaño poblacional (cantidad de habitantes); Kp = Capacidad de Carga poblacional en el sector estudiado (partido, sector de la cuenca o cuenta entera).

El rango del indicador ID va entre 0 y 1; el ID=0 indica que no hay habitantes en el área evaluada, mientras que el ID=1 indica que el tamaño poblacional es el máximo tolerable en el área evaluada, es decir que ha llegado a su capacidad de carga (Kp).

10.2 Indicador de vegetación

El indicador de vegetación se utiliza para estimar de la vegetación verde: su crecimiento, cobertura y producción de biomasa, ya que está relacionado con la actividad fotosintética de la vegetación.

Se obtiene a partir del porcentaje de área con vegetación natural (característica del ambiente donde se encuentra) y por otro lado la clasificada como artificial que se refiere a los cultivos y zonas verdes urbanas.

El análisis de la vegetación y la detección de los cambios de sus patrones, son claves para la evaluación de recursos naturales y su monitoreo. Es por ello que la detección y la evaluación cuantitativa de la vegetación verde constituyen una de las mejores aplicaciones de la percepción remota para el manejo de los recursos ambientales y la toma de decisiones.

Para el caso que nos ocupa, el indicador se calcula:

$$IV = ((a*N) + A)/a$$

Dónde: a es una constante, N es la proporción del área con vegetación natural, y A la del área con vegetación artificial.

El indicador IV se formuló de forma que cuanto más cercano a 1 sea su valor, mayor cobertura de vegetación natural posee, mientras que cuanto más cercano a 0 sea su valor, menor cobertura de vegetación presenta el área evaluada.

10.3 Indicador de modificación del diseño del cauce

Se refiere a las modificaciones del diseño del cauce, si es el diseño en meandros (como en su estado natural) o rectificado (por intervención humana) y refleja la lejanía de la longitud del cauce con respecto a la longitud natural (que es la máxima).

Se calcula a partir de:

$$IMDC = 1 - (\text{long- rio } x / \text{long - MAX})$$

IMDC: de 0 a 1.

El rango del IMDC va de 0 a 1, el valor será 1 cuando la longitud del cauce sea la máxima, mientras que el IMDC valdrá 0 en el caso hipotético que la longitud sea cero. Si se sobrepasaría ese valor significaría que se ha alargado el cauce más allá del valor original.

10.4 Índice de incidencia antrópica

Describe el grado de transformación de la cuenca hidrográfica en relación a las acciones antrópicas realizadas en ella (cultivos, expansión de zonas urbanas, tala de vegetación nativa, modificación de cauces hídricos, entre otros)

Para este índice se tiene la siguiente formula:

$$IIA = ID * (1 - IV) * IMDC$$

Dónde:

ID: Indicador Demográfico

IV: Indicador de Vegetación

IMDC: Indicador de Modificación del Diseño del Cauce

Al igual que para los indicadores, el rango del índice IIA es entre 0 y 1. Cuando IIA=0 significa que el sistema está en su estado natural (desde el punto de vista demográfico, de cobertura de vegetación y del diseño del cauce), mientras que el IIA=1 representa el estado de máxima transformación antrópica de la cuenca, y donde el sistema pierde todas sus características naturales.

Capítulo 3

Marco Metodológico

11. Descripción del área de estudio⁴⁰

El río Cauca en su recorrido, desde su nacimiento en la laguna del Buey del Macizo Colombiano hasta su desembocadura en el Río Magdalena, forma cuatro zonas geográficas: el alto Cauca, que comprende desde su nacimiento en el Macizo Colombiano hasta el embalse de la Salvajina en el municipio de Suarez (Cauca), incluyendo el Valle de Pubenza a la altura de la ciudad de Popayán; el Valle alto desde Suarez hasta La Virginia; el Cauca medio entre la Virginia y la población de Tarazá en Antioquia; y el bajo Cauca desde este último lugar hasta su desembocadura en el río Magdalena.

La hoya hidrográfica del Cauca, en el trayecto señalado como Valle del Cauca o Valle alto, comprende ríos tributarios que bajan del flanco occidental de la Cordillera Central como: El Palo, Desbaratado, Amaime, Sonso, Guadalajara, Tuluá, Bugalagrande, La Paila y La Vieja; y, tributarios del flanco oriental de la Cordillera Occidental: Suarez, Jamundí, Cali y Riofrío.

⁴⁰ *Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).*, y *Universidad del Valle (2009). Modelación Matemática del Río Cauca. Volumen VIII, Fase I. Santiago de Cali, 3.1 -3.3.*

El río Cauca es el principal afluente del río Magdalena, tiene una longitud total de 1350 kilómetros y una hoya hidrográfica aproximada de 63300 Km², lo cual representa el 5.0 % del área de Colombia.

Su trayectoria sigue una dirección Sur – Norte y sus aguas bañan los Departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquía, Córdoba, Sucre y Bolívar (Ver Figura No. 21).

De manera general el río Cauca se puede caracterizar en cuatro tramos o zonas:

1. El Alto Cauca, que comprende desde su nacimiento en el macizo colombiano hasta la Población de Timba, en el límite interdepartamental Cauca – Valle del Cauca, con una longitud aproximada de 170 Km y un descenso de niveles de 4.000 a 1.000 msnm.

2. El Valle del Cauca, en el cual recorre un trayecto de unos 436 kilómetros hasta la población de la Virginia en el departamento de Risaralda, presentando un desnivel de 100 metros en su recorrido, alcanzando aproximadamente la cota 900 msnm.

3. El Cañón del Cauca o Cauca Medio, tramo que comprende un largo descenso de 400 kilómetros a través de cañones estrechos y profundos, desde la Virginia hasta la población de Tarazá en el departamento de Antioquia, ubicada en la cota 90 msnm.

4. El Bajo Cauca, tramo donde el río abandona el cañón y se abre en una zona de suave topografía, con una longitud aproximada de 260 Km hasta su desembocadura en el río Magdalena.



Figura 21. Cuenca de drenaje del Río Cauca

Fuente: Universidad del Valle – CVC

11.1 Delimitación de la Cuenca del Río Cauca.

En este trabajo se delimitó la cuenca del Río Cauca usando el establecido por la Corporación Autónoma del Valle del Cauca – CVC-, la cual fue definida a través de datos observados en el terreno, siguiendo el criterio de la divisoria de aguas, pero además algunos criterios político estratégicos de las jurisdicciones que incluye la cuenca y además, teniendo en cuenta no sólo la traza hidrológica superficial sino también las redes subterráneas.

Igualmente, se tuvo en cuenta el criterio de la divisoria de aguas utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM (píxel: 30m) y la herramienta ArcHydro® (Figura 22).

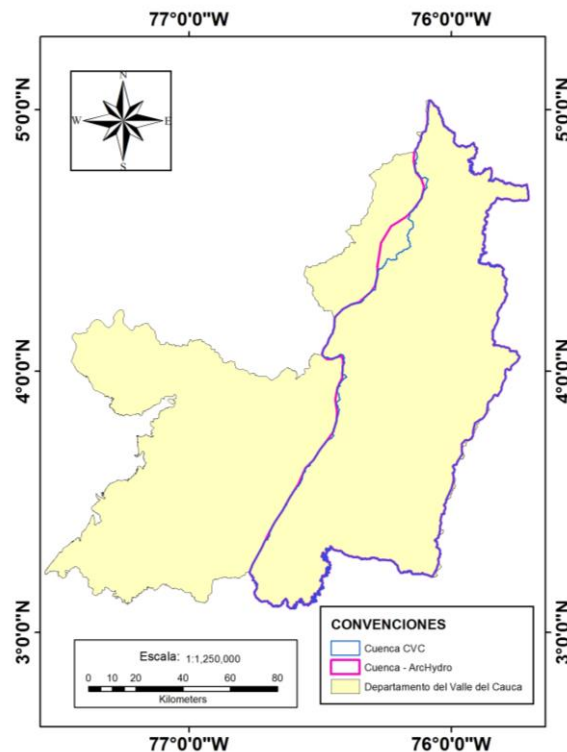


Figura 22. Delimitación de la cuenca con DEM del IDEAM usando ArcHydro y cuenca delimitada

Fuente. CVC, 2015

11.2 Extensión y límites del área de estudio

La Cuenca Tributaria del Río Cauca va desde la represa de Salvajina hasta el municipio de La Virginia, con una longitud aproximada de 460 Km, en su gran mayoría dentro de la zona de jurisdicción de la CVC en el departamento del Valle del Cauca y un corto tramo en departamento del Cauca (Figura No. 23).

La planicie en la que el río discurre presenta una altura que varía entre 900 y 1000 msnm, con materiales de fondo compuestos principalmente por depósitos aluviales.

Para el desarrollo de este proyecto solo se tendrá en cuenta la extensión de la Cuenca Tributaria del Valle del Cauca que se encuentra en jurisdicción del departamento del Valle, el cual comprende un área de 19.349 Km².⁴¹

En el recorrido los afluentes más importantes sobre la margen derecha, donde el valle es más amplio, son los ríos Ovejas, Palo, Amaime, Guadalajara, Tuluá, Bugalagrande y La Vieja; sobre la margen izquierda los tributarios más destacados son los ríos Timba, Jamundí, Riofrío, Cañaveral y Risaralda.

⁴¹ *Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).*, y *Universidad del Valle (2009). Modelación Matemática del Río Cauca. Volumen VIII, Fase I. Santiago de Cali, 3.1.*

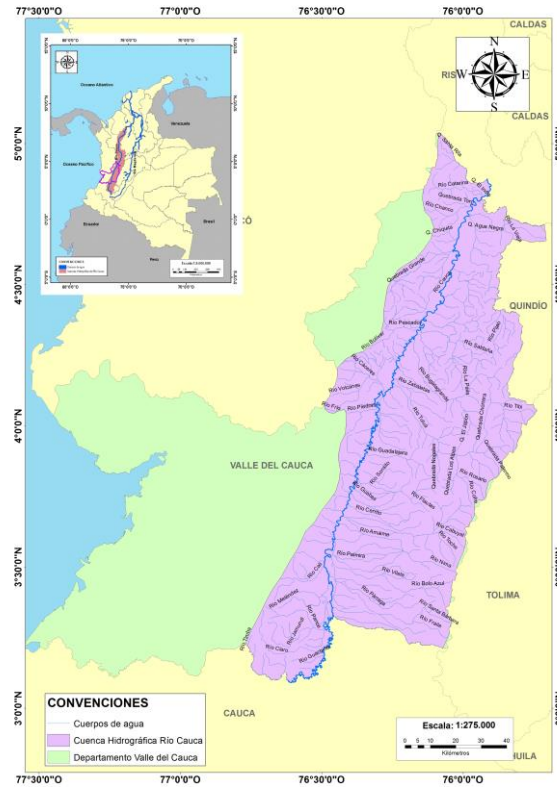


Figura 23 Cuenca Tributaria del Valle del Cauca

Fuente: Propia. 2015

11.3 Caracterización del área de estudio

11.3.1 Características Climáticas.

La cuenca del Río Cauca en la zona del Valle del Cauca, debido a su posición en la zona de mayor insolación, presenta un clima tropical que se caracteriza por temperaturas relativamente altas y uniformes durante todo el año, razón por la cual no es posible identificar estaciones térmicas.

También se caracteriza por la presencia de períodos o estaciones de diferente pluviosidad en el año. La franja comprendida entre las latitudes 0° y 10° N y las longitudes 75° y 80° W transporta aire muy húmedo proveniente del océano Pacífico, con presencia de brisa marina que penetra al Valle del Cauca a través del boquerón del Madroñal y por un sitio cercano a la población de Bolívar.

En la zona del valle geográfico del Río Cauca las tendencias de variación que presentan en promedio las temperaturas máximas, medias y mínimas a escala mensual, se pueden considerar uniformes durante todo el año. La duración del brillo solar presenta una tendencia de variación anual: mayor en los meses secos y menor en los húmedos.

En relación con la humedad relativa los valores promedios varían entre el 65% y el 90%. La mayor parte de las lluvias en la región del valle del Río Cauca es de origen convectivo u orográfico. Entre el 80 y 90% de las grandes lluvias ocurren en las tres primeras horas de las tormentas.

Existen dos períodos de bajas precipitaciones (enero - febrero y junio - septiembre) y dos de altas precipitaciones (Marzo – Mayo y Octubre – Diciembre). El promedio anual de lluvias varía entre 800 y 3800 mm.

11.3.2 Hidrología.

El Río Cauca y sus más importantes tributarios presentan un régimen de caudales directamente ligado al régimen de pluviosidad con dos períodos secos y dos húmedos. El caudal medio en la estación Juanchito es 274 m³ /s, mientras que en las estaciones Suárez y

La Virginia, localizadas al inicio y al final del tramo en estudio, los caudales medios son $126 \text{ m}^3/\text{s}$ y $531 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

La construcción de la represa de La Salvajina varió el régimen de caudales, especialmente en épocas de estiaje, y en menor medida en períodos de invierno. La mayor parte de los tributarios pueden clasificarse como torrentes con respuestas críticas a lluvias cortas e intensas.

11.3.3 Relieve y fisiografía.

El valle geográfico del río Cauca enclavado en la zona plana del valle que conforman las cordilleras Central y Occidental, hace parte de una gran depresión tectónica interandina con aproximadamente 200 km de longitud por 15 km de amplitud.

La región izquierda del valle geográfico (occidental) proporcionalmente es más angosta que la derecha (oriental), por este motivo el costado derecho corresponde al área que recibe mayor aporte de sedimentos provenientes de la parte alta de la cordillera, en ella se forman los abanicos largos de poca pendiente y que hacen presión sobre el río Cauca hacia la margen izquierda.

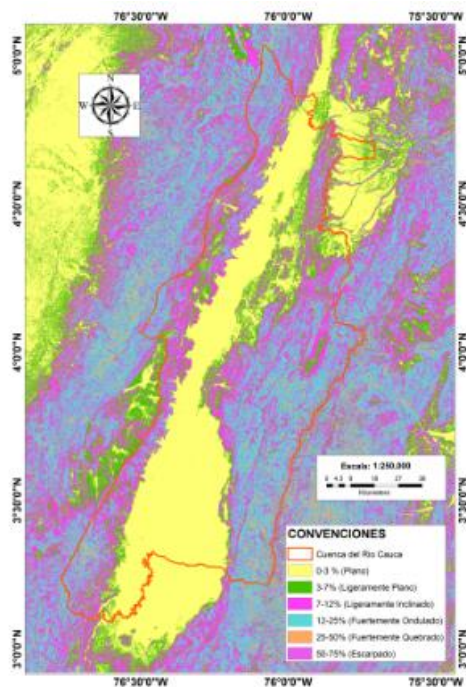


Figura 24. Mapa de pendientes de la Cuenca

Fuente: Elaboración propia a partir del DEM IDEAM 2015

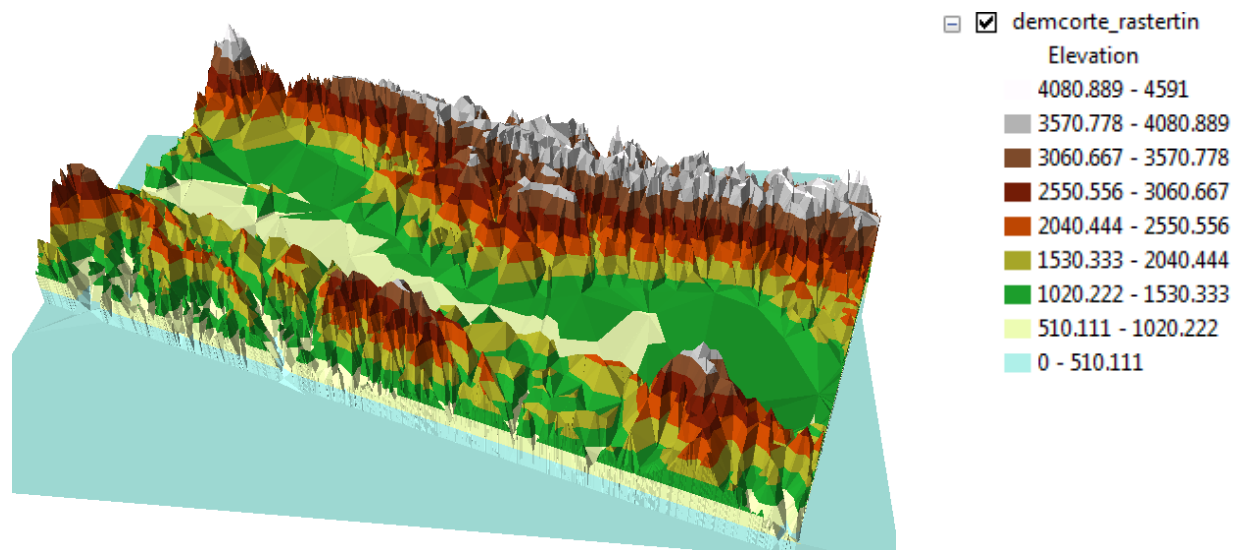


Figura 25. Modelo de elevaciones de la Cuenca

Fuente: Elaboración propia a partir del DEM IDEAM, 2015

11.3.4 Geología.

La fosa tectónica del Valle del Cauca se desarrolló durante el Cretácico Inferior o antes. Las rocas más antiguas (metasedimentos del grupo Cajamarca) se presentan en los flancos de las cordilleras Central y Occidental. Sobre éstas se depositaron, en contacto irregular, las rocas del grupo Diabásico, y posteriormente se depositaron los sedimentos terciarios que posteriormente se plegaron, dejando por último los sedimentos cuaternarios y recientes del Valle.

11. 3.5 Aspectos Ambientales.

La problemática ambiental de la zona de estudio puede resumirse así: presencia de áreas degradadas por uso inadecuado del suelo, contaminación hídrica por aguas servidas de los centros urbanos, complejos industriales y agropecuarios, extracción de materiales del lecho del río, disminución de caudales para atención del consumo humano en corto plazo, deterioro del suelo por la explotación minera, procesos de deforestación y, en general, diferentes tipos de impactos negativos, producto de la actividad humana en su conjunto.

11.3.6 Explotación del Río.

La extracción de materiales del fondo del río (arenas y gravas finas) en el tramo Salvajina – La Virginia constituye un aspecto importante a considerar. Durante el recorrido de reconocimiento realizado en enero de 1998 se identificaron 39 dragas, 4 paladragas y 9 malacates en operación, muchos de ellos sin autorización ni registros de rendimientos. Información de la CVC que data de 1996 mostró que el sector con mayor volumen de extracción fue el de Hormiguero – Juanchito.

En el año 1979 el volumen anual estimado de material explotado en el tramo Suárez – La Virginia fue de 788.400 m³ (Universidad del Valle - CVC, 1980).

En relación con las captaciones de agua (bocatomas laterales, estaciones de bombeo y derivaciones) en enero de 1998 se inventariaron 260, con un caudal total estimado de 64 m³ /s. Las mayores extracciones se producen en el distrito de riego del RUT (Roldanillo – La Unión – Toro, con alrededor de 8000 l/s), en Puerto Mallarino (6400 l/s para el acueducto de la ciudad de Cali) y en el Ingenio Riopaila (5000 l/s).

Con relación a la actividad pesquera, la tabla 2. muestra el fuerte decrecimiento en la actividad como consecuencia probablemente del deterioro en la calidad del agua. Este deterioro también ha llevado a que las actividades recreativas en el río prácticamente hayan desaparecido.

Tabla 2. Relación de la actividad productiva pesquera en el Río Cauca

Año	Pescadores (Un.)	Producción Pesquera (Ton)
1973	1215	1822.5
1976	800	1200
1978	684	960.3

Fuente: Estudio Morfológico del Río Cauca (Universidad del Valle – CVC, 1980)

11.3.7 Planicies de Inundación

El Río Cauca en su recorrido a lo largo del Valle del Cauca se desborda periódicamente en el tramo Timba - La Virginia, ocasionando daños y pérdidas económicas considerables, debido a las inundaciones de las tierras adyacentes a sus márgenes, las cuales son aprovechadas para fines de agricultura y ganadería.

La CVC tiene identificadas 82945 hectáreas afectadas directa o indirectamente por las inundaciones producidas por el río Cauca. El 18.2 % del área afectada por inundaciones está dedicada a pastos y el resto a cultivos agrícolas distribuidos entre cultivos temporales y permanentes. Estos últimos representan el 51.1%, dedicados especialmente a la caña. Los cultivos temporales que ocupan mayor extensión son en su orden: la soya, el sorgo y el algodón.

11.3.8 Usos del suelo en el Valle del Río Cauca.

En la unidad fisiográfica del valle geográfico del río Cauca se puede referenciar la planicie aluvial de desborde en proximidades del río en zonas inundables, donde se producen las mayores acumulaciones de sedimentos aluviales, son suelos profundos regularmente drenados con algunas limitaciones de salinidad. Actualmente están dedicados a la agricultura y a la ganadería extensiva.

Dentro de esta unidad fisiográfica se encuentra una zona de terrazas de origen sedimentario fluvio-lacustre de textura arcillosa, con drenaje pobre y limitado por presencia de sales y/o sodio, la actividad económica es la agricultura mecanizada principalmente con cultivos de caña de azúcar y pastos. Hacia el piedemonte se identifican dos tipos de suelos

como son los abanicos antiguos y los recientes distribuidos indistintamente en el valle desde el río hasta el pie cordillerano. El material que conforma estos suelos es de origen aluvial limitados por sales en los abanicos recientes y en los antiguos con horizontes compactos, con gravas y pedregosidad. La actividad de mayor relevancia en esta zona es la agricultura con cultivos de caña de azúcar, soya, algodón, maíz, sorgo, plátano, vid, yuca y hortalizas, entre otros.

El análisis para las grandes regiones muestra que, con respecto a la cuenca del río Cauca (1.073.886 has), el 41.7% corresponde a tierras forestales de las cuales el 27.8% son tierras forestales protectoras (F3); del 11.8% de las tierras de cultivos, el 6% corresponde a tierras de cultivos multiestratificados (C4); del 27.9% para valle geográfico, el 2.1% corresponde a áreas para pastoreo (P); 9% a áreas para recuperar (AF) y el 16.5% restante en otros usos u ocupaciones.

USO ACTUAL	CAUCA (has)	%	PACIFICO (has)	%	TOTAL (has)	%
Bosque de mangle (BM)			47712.1	4.8	47712.1	2.31
Bosque de guadua (BG)	7527.9	0.7	451.1	0.0	7979.0	0.39
Bosque natural (BN)	157439.5	14.7	700625.8	70.5	858065.3	41.50
Bosque plantado (BP)	12463.9	1.2	9194.3	0.9	21658.3	1.05
Pasto natural (PN)	414474.5	38.6	121034.6	12.2	535509.1	25.90
Rastrojo (RA)	61218.3	5.7	57717.5	5.8	118935.8	5.75
Vegetación de páramo (VP)	44465.0	4.1	27.3	0.0	44492.3	2.15
Caña de azúcar (CAÑA)	184954.5	17.2			184954.5	8.94
Cultivos permanentes (CP)	150547.1	14.0	29959.8	3.0	180506.9	8.73
Cultivos semipermanentes (CSP)	2425.0	0.2	1205.3	0.1	3630.4	0.18
Cultivos transitorios (CT)			2217.2	0.2	2217.2	0.11
Arenales (AR)			4016.5	0.4	4016.5	0.19
Cuerpos de agua (HU)	6111.5	0.6	15230.4	1.5	21341.9	1.03
Minería (MI)	1054.0	0.1			1054.0	0.05
Infraestructura (INFRA)	6735.9	0.6	1799.6	0.2	8535.5	0.41
Zonas urbanas (ZU)	24468.8	2.3	2688.8	0.3	27157.6	1.31
Total	1073885.7	100.0	993880.4	100.0	2067766.1	100.00

Figura 26. Uso actual del suelo en el Departamento del Valle del Cauca

Fuente: CVC, proyecto SIG 2002.

11.4 Características Hidráulicas y Morfológicas⁴²

El Río Cauca en el tramo Salvajina – La Virginia presenta un ancho medio de 105 metros y una profundidad media a banca llena de 7.4 metros. El ancho a banca llena puede fluctuar desde 80 metros en la parte alta del cauce (sector Salvajina – La Balsa) hasta 150 metros en la parte baja (sector Anacaro – La Virginia). La profundidad media a banca llena puede variar entre 3.5 y 8.0 metros. El perfil longitudinal del río presenta una forma cóncava con pendiente hidráulica que puede oscilar entre valores promedios de 7×10^{-4} (Salvajina-La Balsa) y 1.5×10^{-4} (tramo Mediacanoa-Anacaro). El coeficiente de rugosidad de Chezy presenta un valor promedio de $47 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

11.4.1 Caudal.

Con base en los registros consignados en el Boletín Hidrológico de CVC del año 1996 se calcularon los caudales medios mensuales multianuales para los períodos Pre-Salvajina y Post- Salvajina. A partir de los histogramas de caudales medios obtenidos es posible realizar las siguientes observaciones:

- El Río Cauca presenta un régimen de caudales bimodal, con dos períodos de verano o de caudales bajos (enero-marzo y julio-septiembre) y dos de invierno o de caudales altos (abril-junio y octubre-diciembre).

⁴² CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL VALLE (2001). Modelación Matemática del Río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Volumen VIII, Fase I. Proyecto de Modelación del Río Cauca – PMC. Santiago de Cali, Colombia.

- El rango de variación de los caudales medios mensuales multianuales en el período Post- Salvajina es menor al rango de variación del período Pre-Salvajina. Así, durante los meses de estiaje los caudales medios mensuales registrados en el período Post-Salvajina son superiores a los registrados en el período Pre-Salvajina y durante la época de invierno los caudales medios mensuales del período Pre-Salvajina son superiores a los caudales medios mensuales del período Post-Salvajina.

El mayor efecto de regulación del embalse Salvajina se aprecia durante los períodos de invierno y en las estaciones ubicadas más próximas al embalse.

11.4.2 Hidrografía.

El régimen de caudales del Río Cauca y sus tributarios más importantes está directamente relacionado con el régimen pluvial, presentando dos períodos húmedos entre los meses de abril - junio y octubre - diciembre, un período seco entre los meses de Julio - septiembre y un período de caudales bajos medios (enero-marzo). En promedio, los caudales máximos ocurren durante los meses de noviembre y mayo, mientras que los mínimos se presentan en los meses de agosto y septiembre.

El régimen hidrológico del Río Cauca ha experimentado una variación, principalmente en sus caudales extremos, desde el año 1985 cuando entró en operación el embalse de Salvajina. Este cambio en el régimen de caudales y niveles es una consecuencia del efecto regulador del embalse y posiblemente de otros factores, tales como las variaciones climáticas, la deforestación en las cuencas tributarias y los cambios en el uso del suelo.

11.4.3 Hidrología.

Los ríos afluentes del Río Cauca en el tramo Salvajina – la Virginia se pueden clasificar, en general, como torrentes, de pendiente fuerte, que presentan crecientes considerables de corta duración y aportan al Río Cauca volúmenes significativos de sedimentos y materiales de arrastre, especialmente durante los períodos de invierno. Los tributarios de la margen derecha presentan cuencas de drenaje de mayor extensión. Los ríos afluentes más destacados, en su orden son: La Vieja, Palo, Risaralda, Ovejas, Timba, Tuluá, Bugalagrande, Guachal, Jamundí, Amaime, Claro y Riofrío.

Las características fisiográficas y morfométricas de las cuencas de los ríos tributarios, principalmente la densidad de drenaje y el coeficiente de torrencialidad, indican que un número importante de ellas presenta entre buena y alta eficiencia en el sistema del drenaje superficial. Por otra parte, el coeficiente de compacidad, el factor de forma y el índice de alargamiento de las cuencas presentan valores cercanos a la unidad, lo cual, sumado a la eficiencia en el drenaje superficial, denota la tendencia a generar crecientes en la mayoría de los ríos tributarios.

Los tributarios del Río Cauca en el departamento del Valle del Cauca son ríos que con sus aportes líquidos y sólidos afectan el comportamiento hidrológico, hidráulico, sedimentológico y morfológico del Río Cauca. En general presentan hidrologías irregulares, con caudales máximos que superan ampliamente los caudales medios.

11.5 Urbanización de la Cuenca

La configuración del Valle como un gran corredor ha orientado un patrón de poblamiento hispánico que se mantiene hoy en la red urbana-regional del Valle del Cauca. En efecto se observa la disposición longitudinal de los centros poblados a ambos lados del río. Los factores que han condicionado la localización son la existencia de terrenos de piedemonte, que presentaban nuevas condiciones topográficas para la localización, protección de los cerros y lomajes y principalmente buenas condiciones micro climáticas (menos insalubres que las áreas bajas). Luego, los "Llanos" de la banda occidental mostraron sus condiciones naturales apropiadas para la construcción y el desarrollo de labores agrícolas. Otro factor han sido los cursos de agua a cuyas orillas en general se han emplazado los centros poblados.

La cuenca se encuentra ocupando una gran área de la Ciudad de Cali (Capital del Departamento del Valle y ciudades intermedias como Palmira, Buga, Tuluá y Roldanillo, las cuales son las zonas más densamente pobladas del departamento a excepción de Buenaventura y que durante el último siglo ha sufrido un aumento demográfico muy acelerado y sostenido en el tiempo sin planificación y por lo tanto, con un gran impacto ecológico que ha sufrido desde el inicio de los asentamientos el sistema fluvial.

La cuenca se distingue por sus características esencialmente diferentes: una zona altamente urbanizada (longitudinal a la cuenca), otra periurbana o urbana en vías de expansión y un área rural (ubicada hacia las cordilleras occidental y central) donde todavía se mantienen algunas condiciones ambientales satisfactorias.

11.6 Carga Contaminante⁴³

En el tramo Hormiguero – Mediacanoa es donde se presenta la mayor contaminación por materia orgánica. Aquí el Río Cauca recibe directamente las cargas contaminantes de los municipios de Cali y Vijes, los aportes de los ríos Guachal, Cali, Desbaratado, Yumbo, Cerrito y Sonso, y la gran mayoría de las industrias que descargan directamente al Río Cauca, donde se destacan las empresas del sector paplero.

El Tramo Mediacanoa - La Virginia el Río Cauca recibe las descargas de aguas residuales domésticas e industriales de poblaciones importantes como Buga, Tuluá, Bugalagrande y Cartago a través de los ríos tributarios localizados en la zona. También recibe directamente las cargas contaminantes de algunos ingenios y de los municipios de Bolívar, Zarzal y Obando.

En esta zona el río presenta una recuperación natural, la cual es posible por la reducción significativa de los aportes de carga contaminante.

El mayor aporte de carga contaminante en el tramo Mediacanoa - La Virginia está representado por la entrega de los ríos tributarios Tuluá, La Paila y La Vieja; los cuales reciben los vertimientos de las aguas residuales de municipios como Tuluá (en el caso del

⁴³ Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), y Universidad del Valle (2009). *Modelación Matemática del Río Cauca. Volumen VIII, Fase I. Santiago de Cali*, 3.98

Río Tuluá), las aguas mieles del beneficio del café (en el caso de los ríos La Paila y La Vieja) y las descargas de algunas industrias de alimentos e ingenios azucareros.

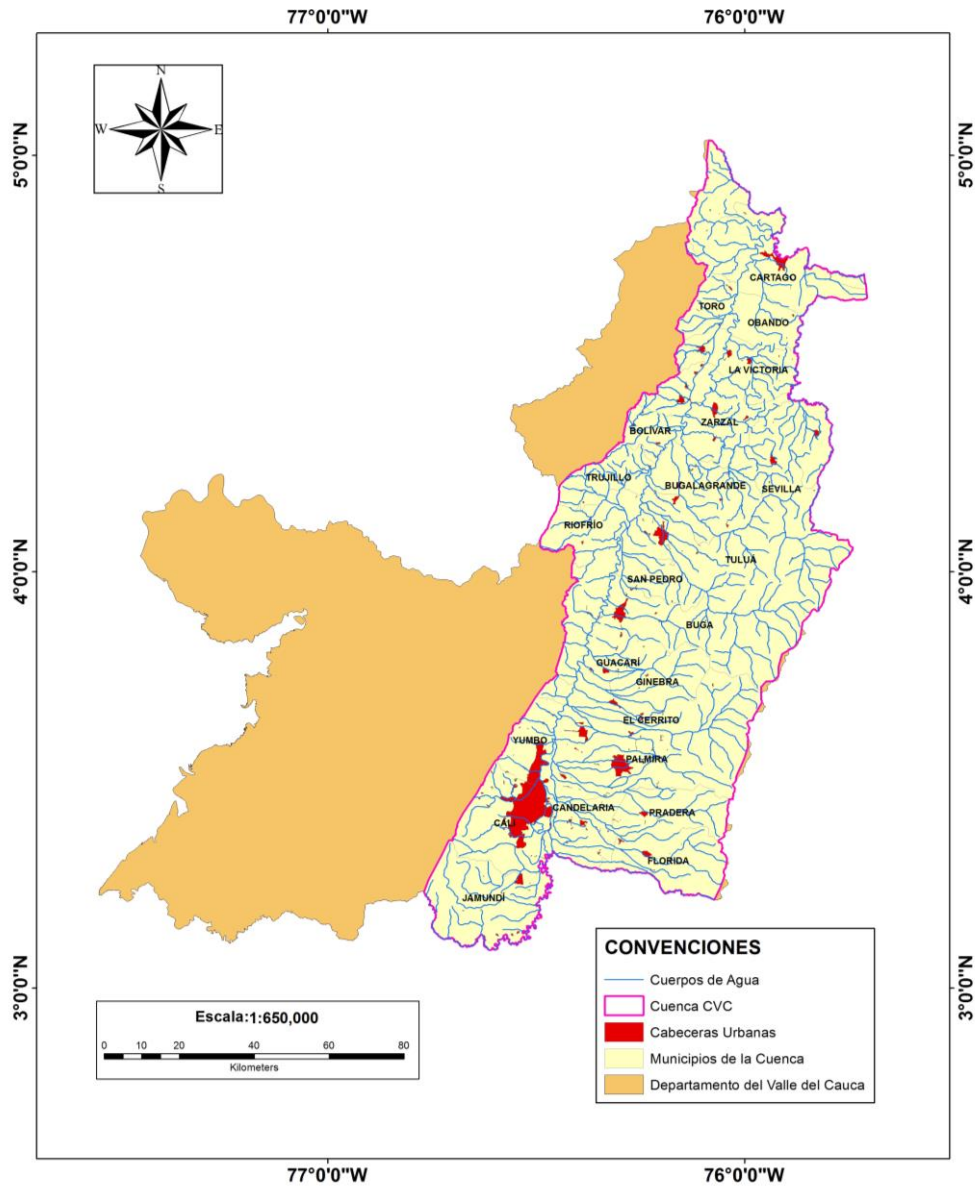


Figura 27 Urbanización de la Cuenca del Río Cauca

Fuente: Elaboración propia, 2015

12. Zonas de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauca

El Río Cauca en el Departamento del Valle sigue una dirección Sur – Norte. En su recorrido atraviesa una de las ciudades capitales más densamente pobladas: Santiago de Cali y 33 municipios del Departamento. La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC-, tiene establecida las siguientes zonas de trabajo en el Departamento para el estudio de la cuenca:

Tabla 3. Zonas de trabajo CVC

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)
		CANDELARIA	10237,63491
1	DESDE JUANCHITO HASTA RIO GUACHAL	PRADERA	29716,67896
		PALMIRA	25305,27067
		BUGA	46480,73389
		SAN PEDRO	6263,419296
2	DESDE RIO FRIO HASTA RIO LA VIEJA	TULUA	82927,87056
		ANDALUCIA	10585,89624

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)
		BUGALAGRANDE	40613,40472
		SEVILLA	41613,04804
		ZARZAL	33988,79012
		LA VICTORIA	20106,89384
		OBANDO	18306,3866
		CARTAGO	15564,4633
		PALMIRA	73367,6694
		EL CERRITO	44095,86086
		GINEBRA	26791,49309
3	DESDE GUACHAL HASTA RIO FRIO	GUACARI	16316,32734
		BUGA	35487,95325
		SAN PEDRO	14237,09023

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)
		FLORIDA	40461,87963
4	DESDES RIO PALO HASTA JUANCHITO	CANDELARIA	16723,79935
		PRADERA	5932,63207
		CALI	21139,4272
		YUMBO	22793,76416
		PALMIRA	1522,663748
5	DESDE JUANCHITO HASTA RIO PALO	VIJES	4475,276892
		YOTOCO	26485,44752
		RIOFRIO	28589,46131
		TRUJILLO	19548,79221
		BOLIVAR	3,40084627
6	DESDE EMBALSE SALVAJINA HASTA JUANCHITO	JAMUNDI	60455,35073

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)
		CALI	35913,77732
		TRUJILLO	7490,997487
		BOLIVAR	14694,33011
		ROLDANILLO	14975,46107
7	DESDE RIO FRIO HASTA RIO RISARALDA	LA UNION	9778,654524
		TORO	16555,34187
		ANSERMANUEVO	28897,70993
		EL AGUILA	18378,76931
		SEVILLA	14025,024
		CAICEDONIA	16705,37421
8	RIO LA VIEJA	ZARZAL	921,1194195
		LA VICTORIA	5571,050031

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)
		OBANDO	2958,235615
		ALCALA	6228,834901
		ULLOA	4255,783789
		CARTAGO	8957,490587

Fuente: CVC, 2010

Sin embargo, se abordará la cuenca en el presente estudio de la siguiente manera abordándolo de acuerdo a las unidades territoriales:

Tabla 4. Zonas de trabajo para el estudio

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)	% CUENCA	AREA
1	ZONA SUR	JAMUNDI	60.757,31		5,68
		FLORIDA	40.473,11		3,78
		CANDELARIA	29.334,89		2,74

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)	% CUENCA	AREA
		PRADERA	35.676,39		3,34
		CALI	57.596,43		5,39
		YUMBO	23.117,93		2,16
		PALMIRA	100.472,89		9,40
		EL CERRITO	44.206,48		4,13
		VIJES	4.546,70		0,43
2	ZONA CENTRO	GINEBRA	26.795,01		2,51
		GUACARI	16.344,73		1,53
		BUGA	82.458,78		7,71
		SAN PEDRO	20.500,51		1,92
		YOTOCO	28.856,28		2,70

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)	% CUENCA	AREA
		TULUA	90.554,36		8,47
		RIOFRIO	29.922,66		2,80
		ANDALUCIA	10.585,90		0,99
		BUGALAGRANDE	40.883,04		3,82
		TRUJILLO	27.321,21		2,56
3	ZONA NORTE	SEVILLA	55.638,07		5,20
		CAICEDONIA	16.712,25		1,56
		ZARZAL	35.049,63		3,28
		BOLIVAR	15.227,69		1,42
		ROLDANILLO	17.344,00		1,62
		LA VICTORIA	25.677,94		2,40

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA (Has)	% CUENCA	AREA
		LA UNION	11.241,65		1,05
		OBANDO	21.315,67		1,99
		ALCALA	6.228,83		0,58
		TORO	17.685,84		1,65
		ULLOA	4.255,78		0,40
		CARTAGO	24.931,86		2,33
		ANSERMANUEVO	29.219,62		2,73
		EL AGUILA	18.378,77		1,72
	TOTAL		1.069.312,21		100

Fuente: Propia, 2015

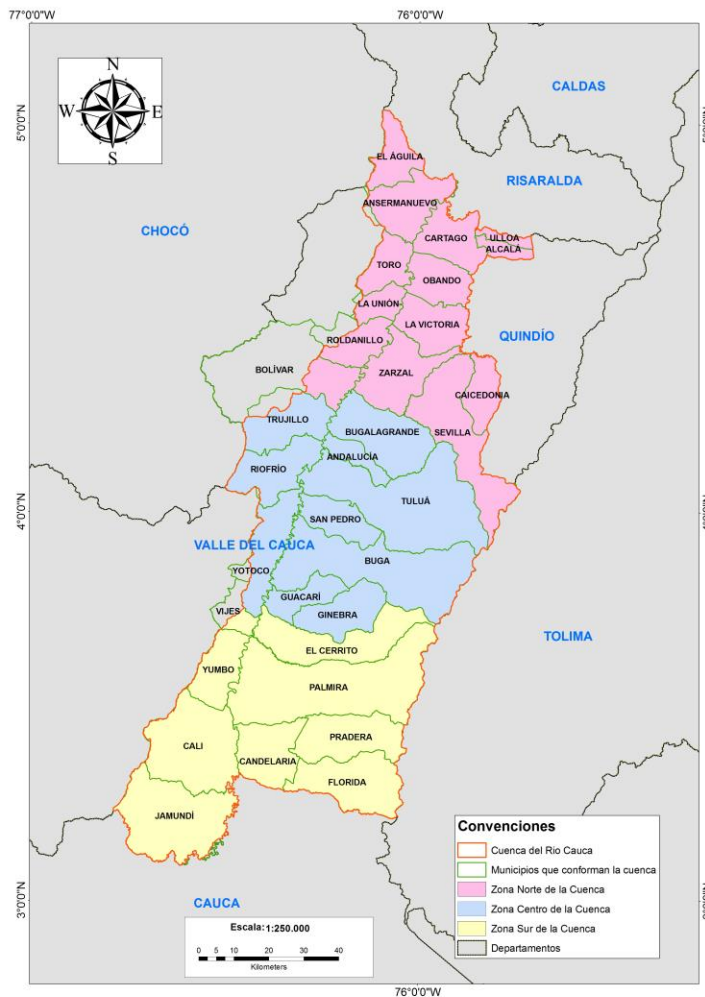


Figura 28. Zonas de trabajo propuestas de la Cuenca del Río Cauca

Fuente: Elaboración propia, 2015

13. Materiales y Selección de Imágenes

Para la consecución de los objetivos planteados se emplearon las siguientes imágenes digitales de la constelación de satélites de Landsat:

Tabla 5. Imágenes Landsat usadas en el trabajo de investigación

<i>TIPO DE SENSOR</i>	<i>ID IMAGEN</i>	<i>PATH - ROW</i>	<i>Fecha de toma</i>
<i>Landsat 5</i>	<i>LT50090571999191XXX06</i>	<i>WRS_PATH = 009 WRS_ROW = 057</i>	<i>1999-07-10</i>
<i>Landsat 5</i>	<i>LT50090581999191CPE07</i>	<i>WRS_PATH = 009 WRS_ROW = 058</i>	<i>1999-07-10</i>
<i>Landsat 7</i>	<i>LE70090572008256EDC00</i>	<i>WRS_PATH = 009 WRS_ROW = 057</i>	<i>2008-09-12</i>
<i>Landsat 7</i>	<i>LE70090582008256ASN00</i>	<i>WRS_PATH = 009 WRS_ROW = 058</i>	<i>2008-09-12</i>
<i>Landsat 8</i>	<i>LC80090572014088LGN00</i>	<i>WRS_PATH = 009 WRS_ROW = 057</i>	<i>2014-03-29</i>
<i>Landsat 8</i>	<i>LC80090582014088LGN00</i>	<i>WRS_PATH = 009 WRS_ROW = 058</i>	<i>2014-03-29</i>

Fuente: Propia, 2015

La búsqueda y descarga de estas imágenes se realizó en el sistema de archivo digital del Servicio Geológico de Estados Unidos - USGS- (<http://www.usgs.gov>). El nivel de procesamiento de dichas imágenes es denominado producto Level L1, que corresponde a imágenes geográficamente referenciadas. El formato de archivos en que fue recibida la imagen es GEOTIFF (archivos TIFF con encabezados que indican posición geográfica). Las imágenes están georreferenciada con el Datum WGS84 y el sistema de proyección UTM en la zona 18 (norte).

Así mismo, se solicitó al Banco Nacional de Imágenes administrado por el Instituto geográfico Agustín Codazzi las siguientes imágenes de Radar:

Tabla 6. Imágenes Radarsat 2 usadas en el trabajo de investigación

<i>TIPO DE SENSOR</i>	<i>ID IMAGEN</i>	<i>Fecha de toma</i>
<i>Radarsat 2</i>	<i>RS2_OK26322_PK264311_DK242715_WI_20110923_105615_HH_HV_SG F</i>	<i>2011-09-23</i>
<i>Radarsat 2</i>	<i>RS2_OK26322_PK264312_DK242716_WI_20110923_105636_HH_HV_SG F</i>	<i>2011-09-23</i>

Fuente: Propia, 2015

La búsqueda de estas imágenes se realizó en la WMS del Banco Nacional de Imágenes. Estas se encuentran ortorrectificadas y georeferenciadas con el Datum WGS84 y el sistema de proyección UTM en la zona 18 (norte).

14. Equipo y Recursos

El trabajo de procesamiento y análisis de la imagen se efectuó en equipos de cómputo propiedad de las autoras con las siguientes características:

Tabla 7. Equipos y recursos

<i>EQUIPO</i>	<i>Procesador</i>	<i>Sistema Operativo</i>	<i>RAM</i>	<i>Disco Duro</i>	<i>Plataforma</i>	<i>Monitor</i>
<i>HP Pavilion g4 Notebook PC</i>	<i>Intel Core i3 2.40 GHz</i>	<i>64 Bits</i>	<i>6.00 GB</i>	<i>40 GB</i>	<i>Windows 7 Home Premium</i>	<i>15"</i>
<i>DELL INSPIRON N 4110</i>	<i>Intel Core i5 2.30 GHz</i>	<i>64 Bits</i>	<i>6.00 GB</i>	<i>500 GB</i>	<i>Windows 7 Home Premium</i>	<i>14"</i>

Fuente: Propia, 2015

Bajo la plataforma Windows 7 Home Premium, se compiló e instalaron los paquetes ENVI, en su versión 5.3., ARCGIS 10.3.1 y ERDAS IMAGINE 2011. En este se

realizaron las operaciones de preprocesamiento y procesamiento de las imágenes. Para el proceso estadístico se utilizó el programa Minitab 17.2.1.

15. Selección de AOI (Área de Interés)

Para realizar la selección del área de interés sobre las imágenes, se hizo necesario realizar un mosaico de las dos imágenes correspondientes a cada uno de los años de estudio (1999, 2008 y 2014). Posteriormente, el área de interés sobre las imágenes se realizó con base en la delimitación de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauca realizada por la CVC, obteniendo los siguientes resultados:

El mosaico de las escenas Landsat (Path: 009 / Row: 057 -058) incluye un área mucho mayor a la totalidad de la cuenca y para reducir el tiempo de procesamiento y el tamaño de los archivos generados se corta como se muestra en la Figura 29.

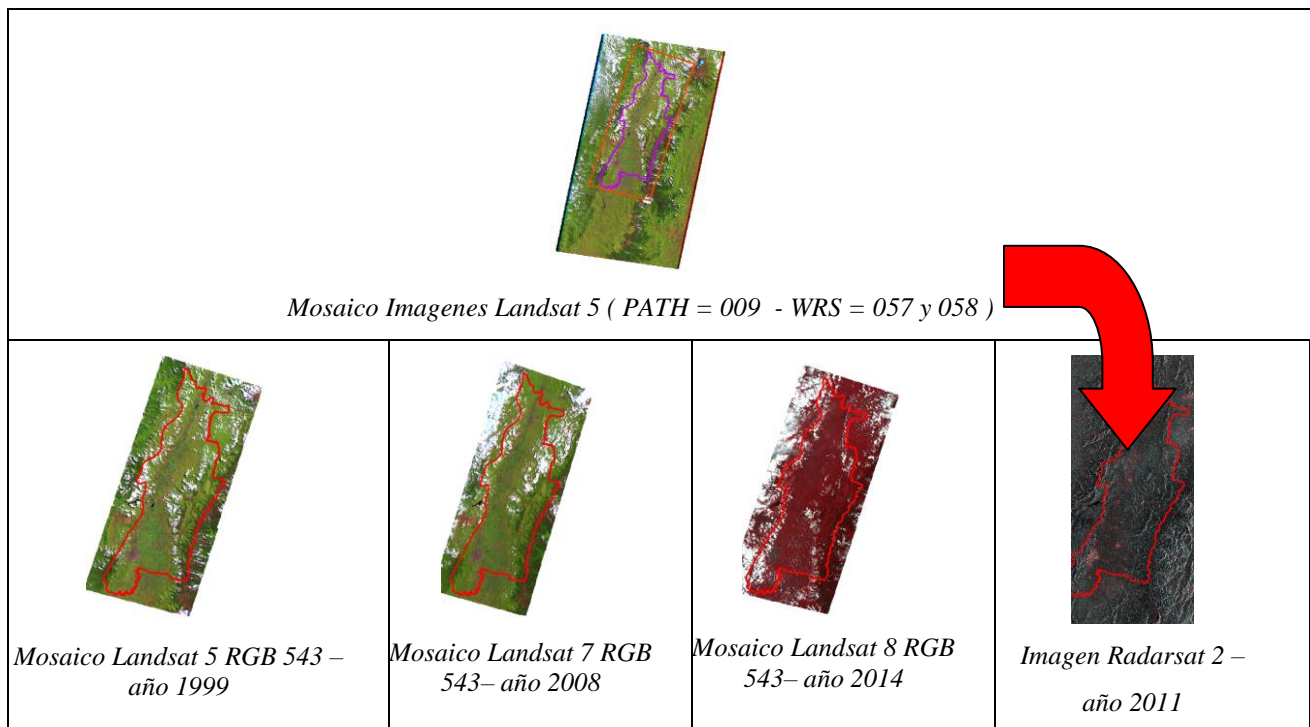


Figura 29. Area de interés

Fuente: Propia, 2015

Capítulo 4

Metodología y Resultados Parciales

16. Tipo de Investigación

El tipo de investigación adelantada en el presente trabajo se puede denominar como investigación aplicada e investigación de campo. En primer lugar aplicada, ya que se colocaron en práctica los conocimientos adquiridos en teledetección para el preprocesamiento, procesamiento y clasificación de imágenes de satélite Landsat y Radarsat 2, con la finalidad de obtener la información necesaria para el cálculo del índice de incidencia antrópica en la cuenca hidrográfica de Rio Cauca en el Departamento del Valle del Cauca y en segundo lugar, de campo porque en el trabajo de investigación, se utilizó información proveniente de entidades como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), además de la recolección de datos en terreno (encuestas y observaciones).

Así mismo, se desarrolló una investigación de carácter documental, a fin de evitar una duplicidad en el trabajo de investigación que se adelantó.

16.1 Desarrollo Metodológico

Para el desarrollo del análisis espacio – temporal de la incidencia antrópica en la Cuenca del Rio Cauca, en el Departamento del Valle a través de herramientas de teledetección, se trabajó con información primaria e información secundaria: la información primaria se recolectó a través de visitas de campo a la zona de estudio, con la

finalidad de conocer los cambios en las unidades vegetales, usos de la tierra y curso del río, permitiendo analizar e interpretar de mejor manera los cambios en la Cuenca.

Para la obtención de la información secundaria se acudirá a entidades como CVC, Alcaldía Municipal de Cali, Universidad del Valle, IGAC, entre otras, que proporcionaron información para realizar la descripción físico-biótica general del área de estudio, además de los documentos como el Plan de Manejo Cuencas Hidrográficas, la metodología basada en Planificación Ambiental, Geografía Rural, Estudio General de suelos, Fotointerpretación y la leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra - CORINE Land Cover adaptada para Colombia a Escala 1:100.000.

El análisis espacio – temporal de la incidencia antrópica en la Cuenca del Río Cauca, se adelantó con seis imágenes de satélite tipo LANDSAT (de los años 1999, 2008 y 2014, Path 9 Row 58 y 57), estas imágenes se obtuvieron de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos. Asimismo, se trabajó con dos imágenes RADARSAT 2 tomadas en el año 2011 para validar la información obtenida a través de las imágenes ópticas, estas imágenes se solicitaron al Banco Nacional de Imágenes.

El procesamiento digital se realizó con el software Erdas imagine, Arcgis 10.3.1 y Envi 5.3. Los procesos de edición y diseño de las coberturas topológicas necesarias para su uso se desarrollaron en Arcgis 10.3.1.

El modelo metodológico que se utilizó integra las técnicas del procesamiento digital de imágenes de satélite con el análisis espacial de la información temática georreferenciada, a través de un Sistema de Información Geográfico.

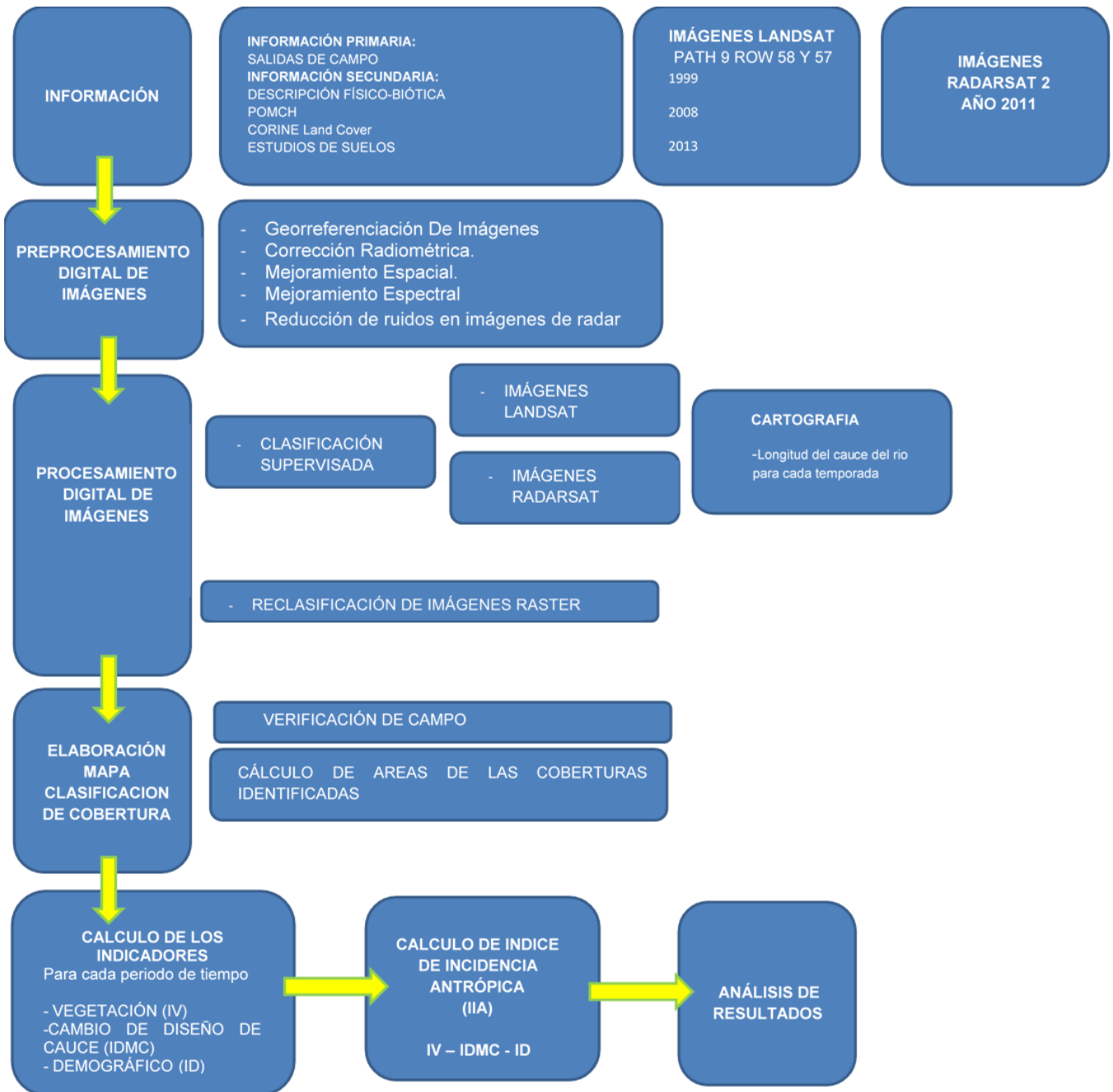


Figura 30. Esquema Metodológico

Fuente: Elaboración propia, 2015

17. Preprocesamiento digital de imágenes

17.1 Imágenes Landsat

17.1.1 Corrección geométrica.

Como las seis imágenes LANDSAT (TM, ETM+ y LDCM) utilizadas en el presente trabajo de investigación son productos L1T (Precision, Terrain Corrected), los cuales consisten en productos con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas, utilizando para ello puntos de control terrestre (GCP) o información de posición integrada a bordo para entregar una imagen registrada a una proyección cartográfica, referenciada a WGS84 – UTM Zone 18. Adicionalmente los datos también contienen una corrección topográfica por el desplazamiento del terreno debido al relieve. Por lo anterior, el único procedimiento efectuado fue la verificación del ajuste geométrico con cartografía.

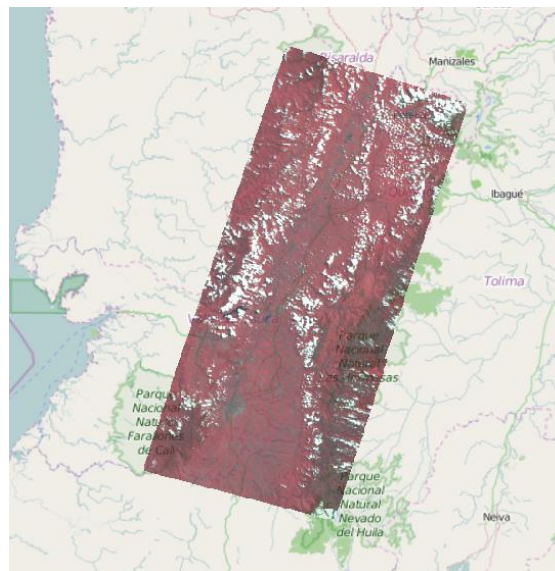


Figura 31. Ajuste Geométrico de la LANDSAT 5 (PATH: 9 – ROW: 57)

Fuente: Elaboración propia, 2015

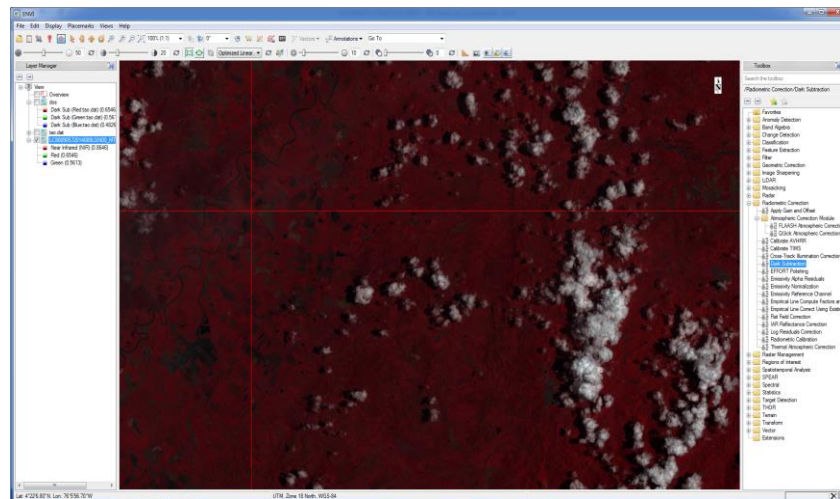
17.1.2 Corrección radiométrica.

La reflectividad es la relación entre la energía reflejada y la incidente, por lo tanto varía entre 0 y 1. La corrección radiométrica de las imágenes se realizó en ENVI 5.3, teniendo en cuenta el metadato de cada imagen (Anexo 1). Con esos datos ENVI calibra automáticamente la imagen usando datos de gain y offset (bias).

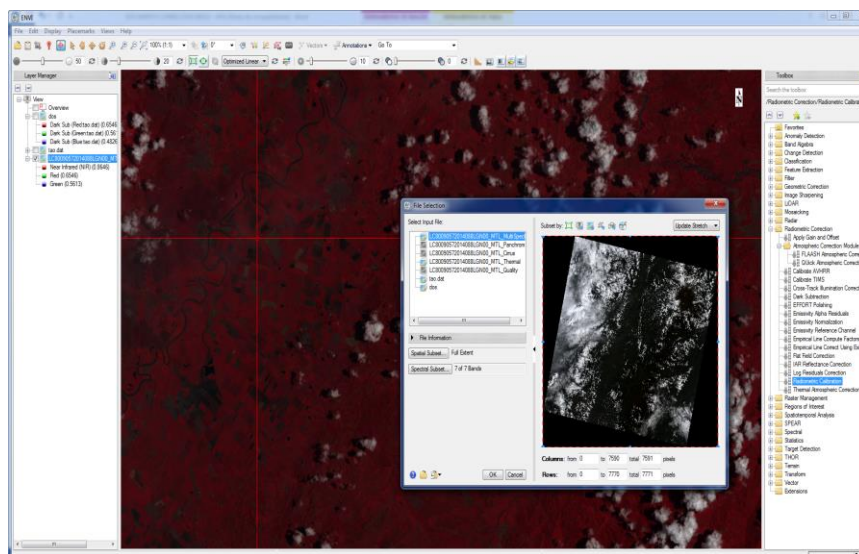
Por ejemplo, el procedimiento realizado para la Landsat 2008 (Path 9 – Row 57), se explica a continuación:

Tabla 8. Procedimiento corrección radiométrica imágenes Landsat

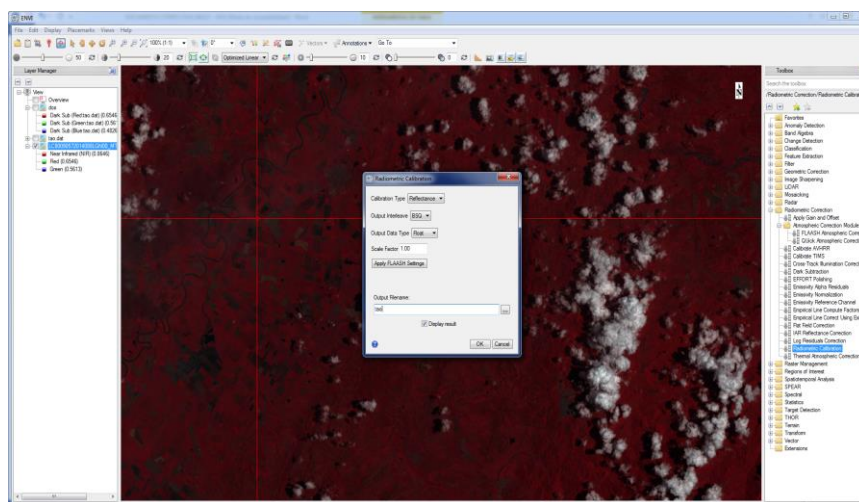
1. Se abre el archivo que contiene el metadato de la imagen, a continuación el programa carga la imagen.



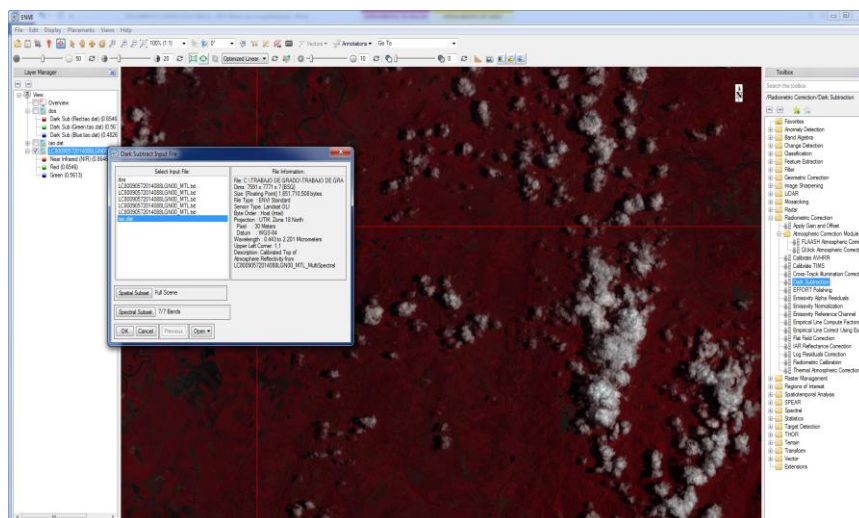
2. Con la herramienta Radiometric Calibration se elige que imagen va ser corregida radiometricamente, para nuestro caso será la multiespectral.



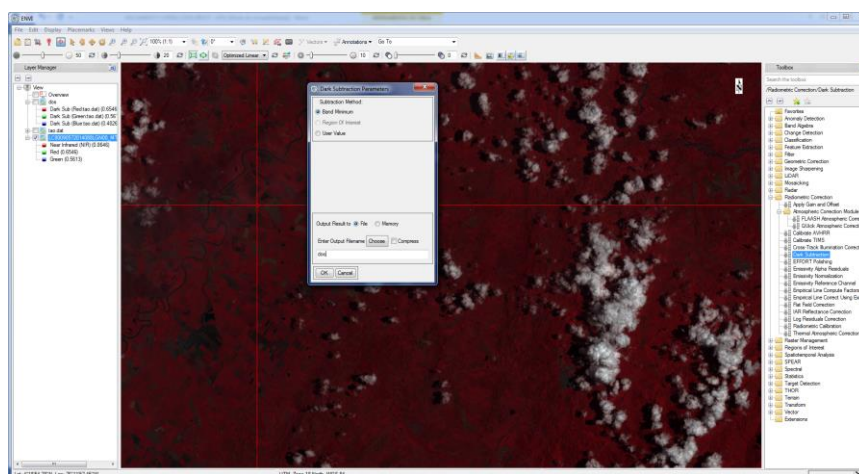
3. Al dar OK en la anterior interfaz, se elige el tipo de calibración a Reflectance. Adicional a esto, se le da la ruta donde se va guardar el archivo resultante



4. Luego en la herramienta *Dark Subtraction*, se procesa la imagen en reflectancia.



5. Se guarda el archivo resultante, el cual ya contiene la corrección atmosférica y la radiométrica.



Fuente: Propia, 2015

Una vez realizado este procedimiento a través de ENVI, se logró obtener las 6 imágenes en radiancia, es decir valores de entre 0 y 1.

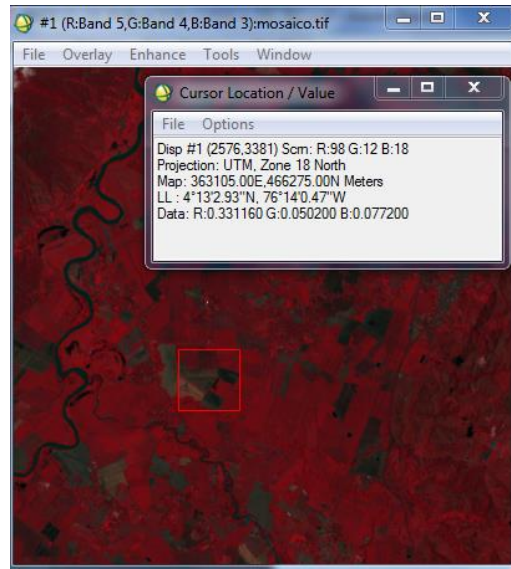


Figura 32. Imagen LANDSAT 8 (PATH: 9 – ROW: 57) en radiancia

Fuente: Elaboración propia, 2015

17.1.3 Corrección atmosférica

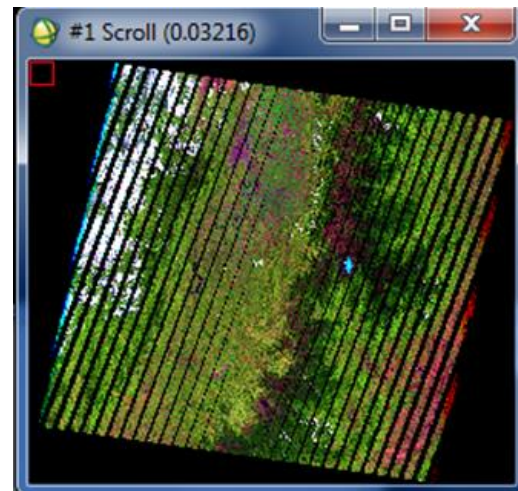
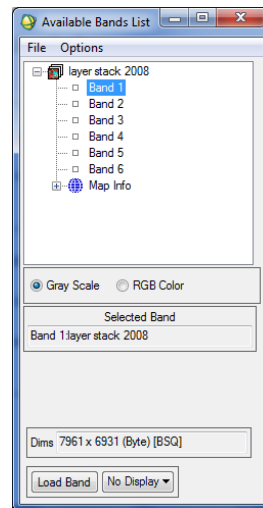
La corrección atmosférica de las 6 imágenes de Landsat se realizó con el módulo Dark Subtraction de ENVI 5.0. La corrección atmosférica sirvió para intentar eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por parte de los gases y partículas en suspensión de la atmósfera, para que las variaciones en los modelos fueran independientes de las condiciones atmosféricas (Chuvieco, 2001).

17.1.4 Tratamiento al bandeado o gap fills

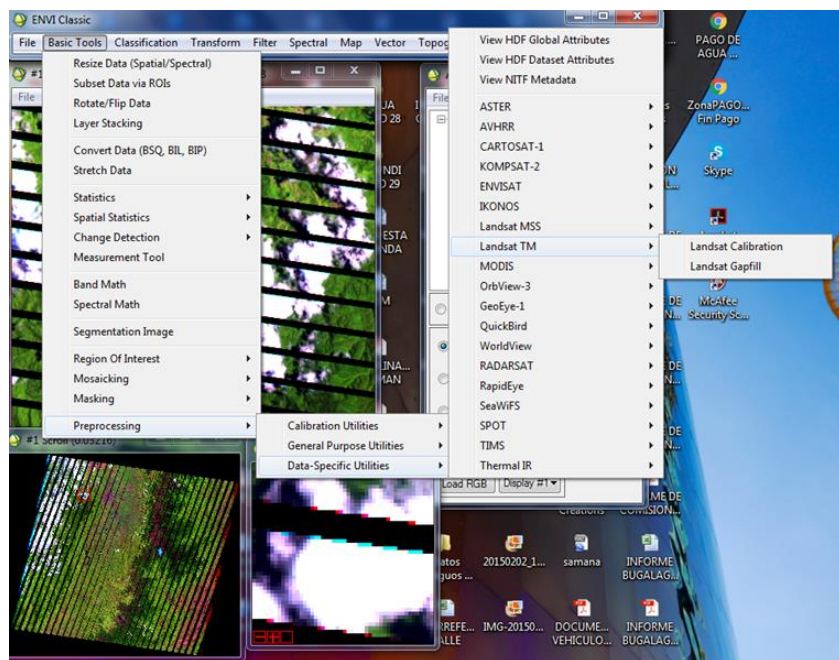
Las dos imágenes Landsat 7 utilizadas en el presente proyecto, estaban afectadas por bandeado o gap fills. Por tal razón, se utilizó la extensión Landsat Gapfill de ENVI 5.0., el procedimiento utilizado fue:

Tabla 9. Procedimiento eliminación de bandeado imágenes Landsat

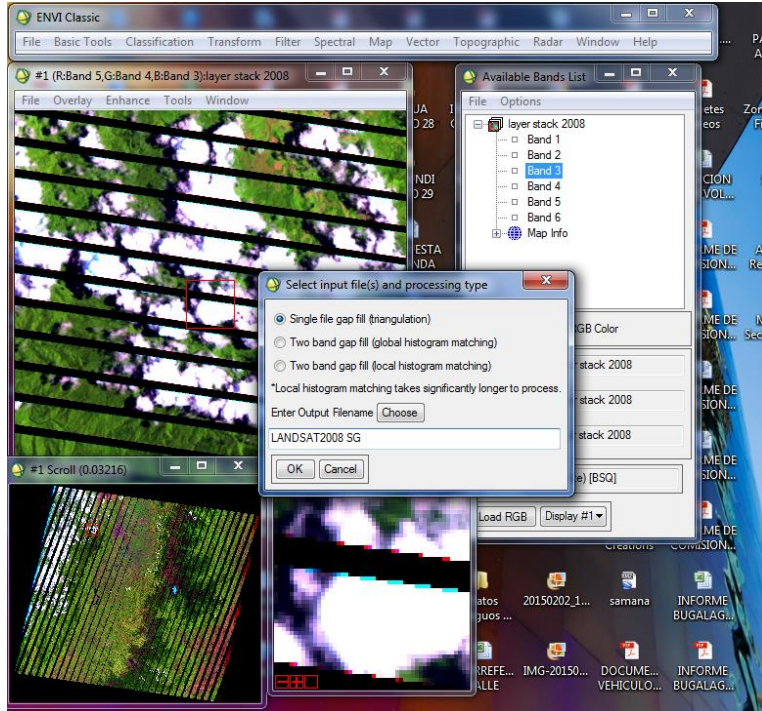
1. Se realiza un Layer Stack de la imagen original con las bandas que se van a trabajar y se abre la imagen Landsat 2008 en el Envi.



2. Previamente se instala la herramienta Landsat Gapfill de Envi y despliega la herramienta.



3. Una vez desplegada la herramienta Landsat Gapfill se da click en la opción de Single file gap fill (triangulation) y se da la ruta donde se va guardar el archivo reparado



Fuente: Propia, 2015

Una vez ejecutado el procedimiento descrito se obtuvo el siguiente resultado:

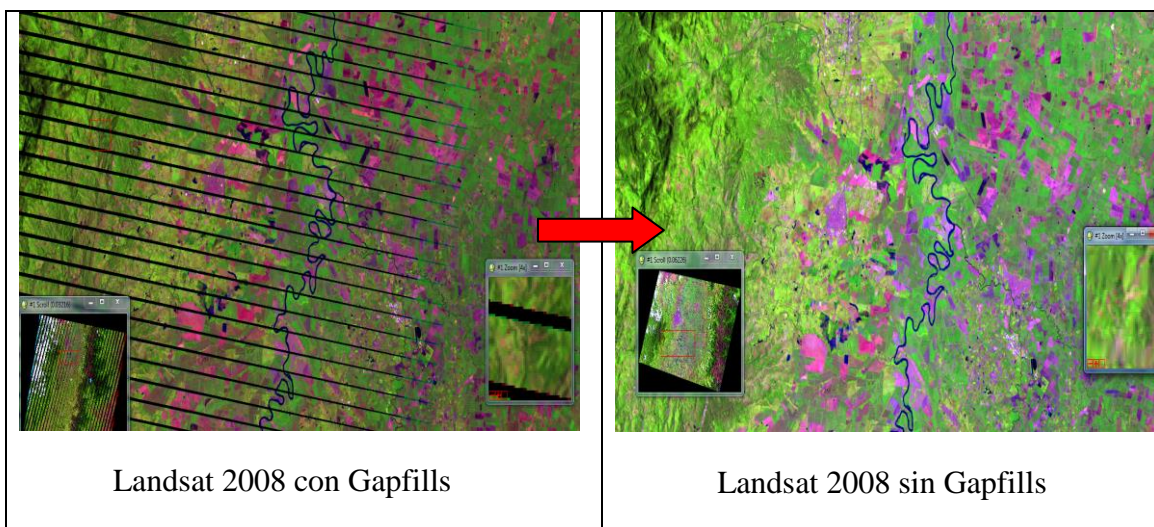


Figura 33. Eliminación de bandeado en Imagen LANDSAT 7

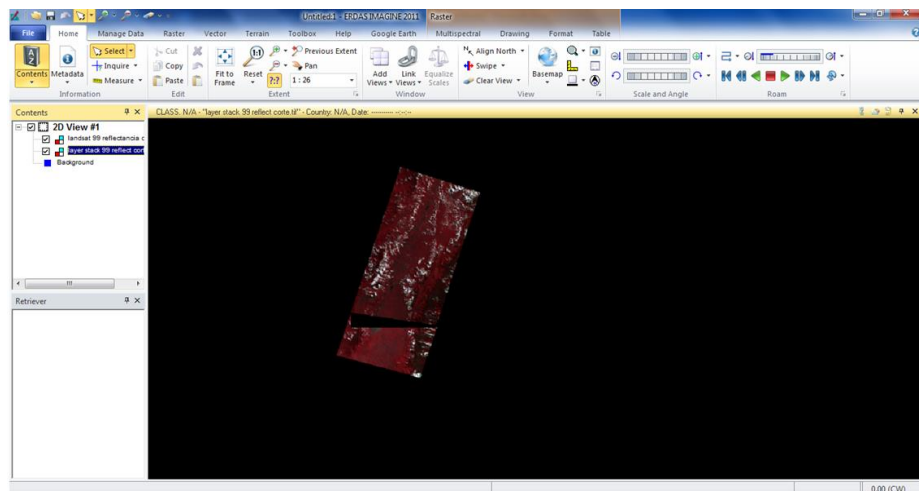
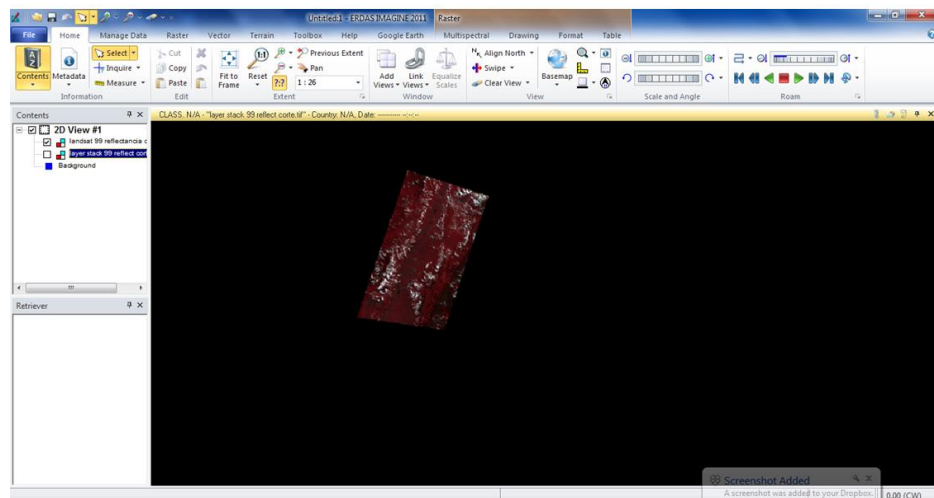
Fuente: Elaboración propia, 2015

17.1.5 Elaboración de mosaicos.

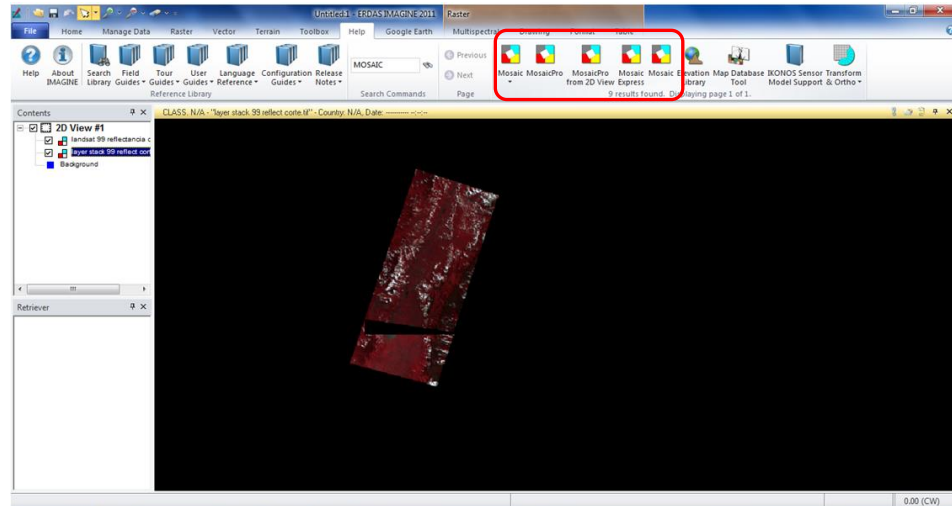
Una vez realizadas las correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas en las 6 imágenes Landsat, se procedió a realizar los cortes de las imágenes conforme a la zona de estudio y a elaborar el mosaico entre las dos imágenes de cada año 1999, 2008 y 2014, con el comando Mosaic de ERDAS IMAGINE 2011.

Tabla 10. Procedimiento elaboración de mosaicos

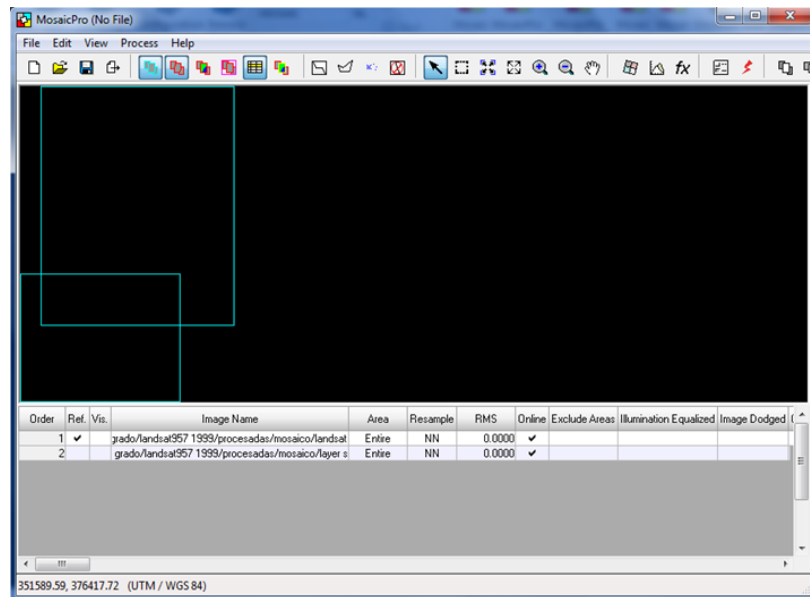
1. En Erdas abren las imágenes que conformarán el mosaico.




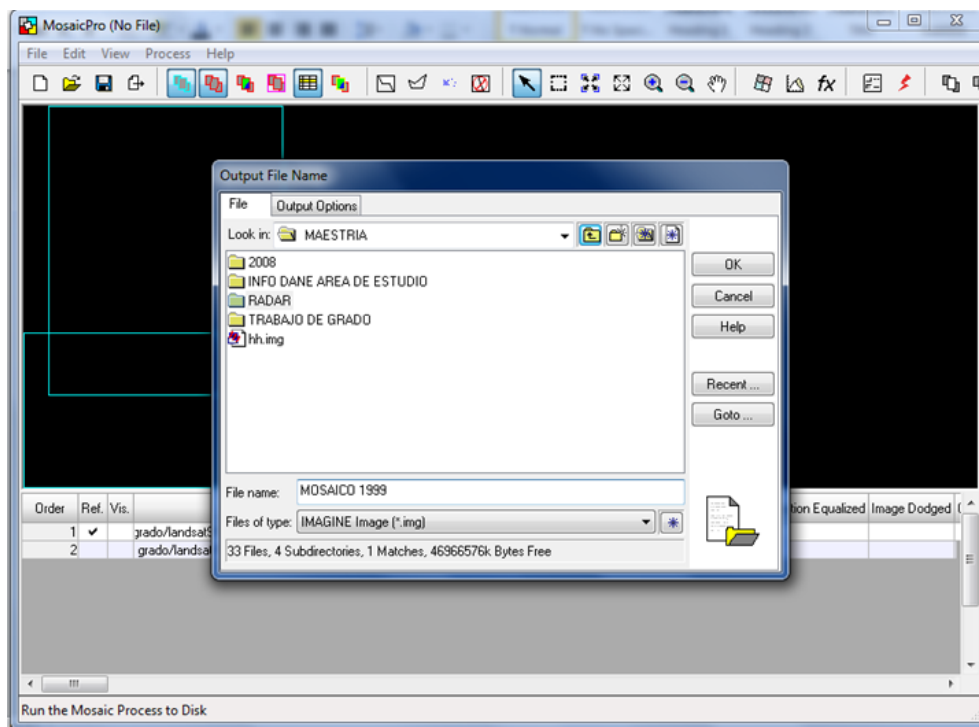
2. Se da click en la herramienta Mosaic de Erdas



3. Se cargan las imágenes en la herramienta de Mosaic

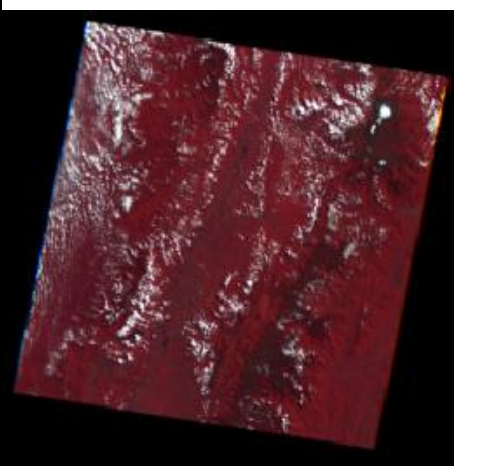
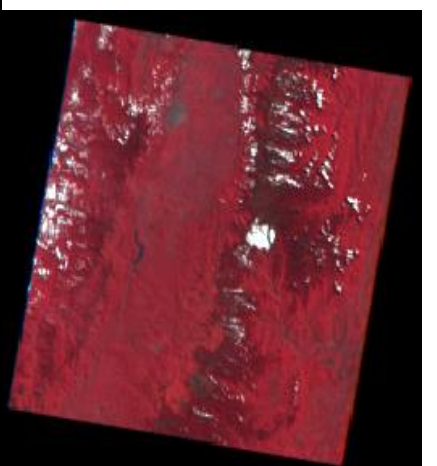

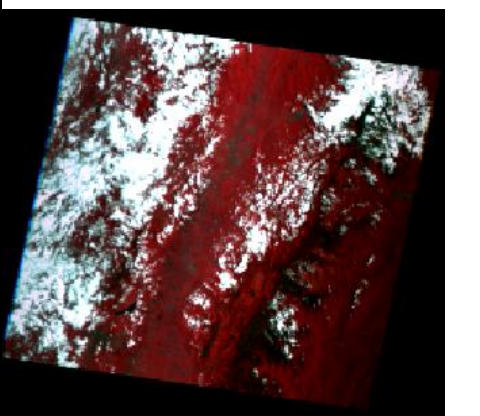
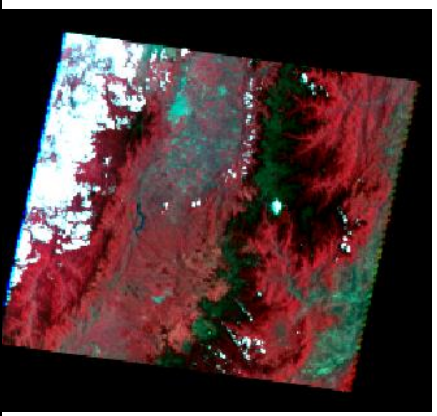
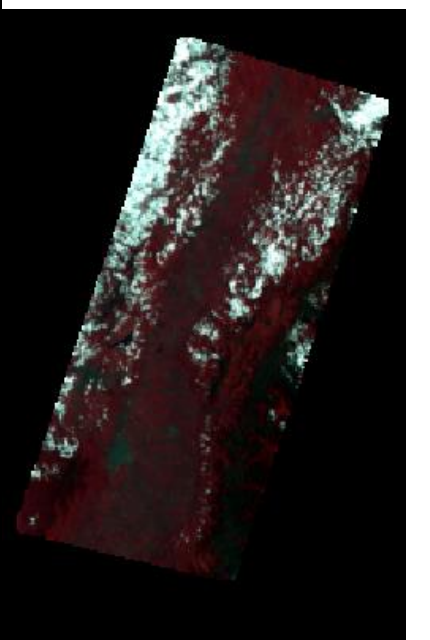


4. Se coloca a
generar el
proceso de
mosaico
dando click en
el icono 
y se guarda el
archivo
generado



Fuente: Propia, 2015

Con el procedimiento anteriormente descrito se obtuvieron los siguientes resultados obteniendo la cobertura del área objeto de estudio:

<i>Landsat 9 - 57</i>	<i>Landsat 9 - 58</i>	<i>Mosaico</i>
		 <p data-bbox="1127 890 1422 919"><i>Mosaico Landsat ano 1999</i></p>
		 <p data-bbox="1127 1596 1422 1625"><i>Mosaico Landsat ano 2008</i></p>

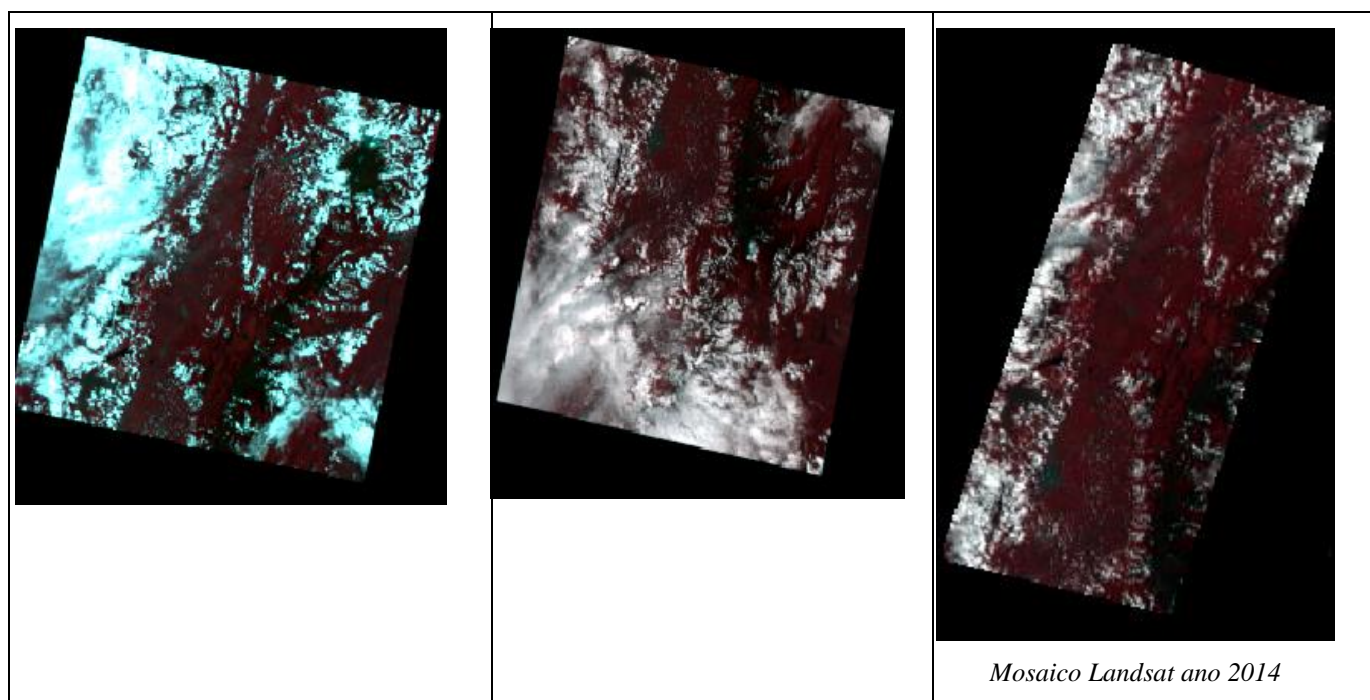


Figura 34. Mosaicos imágenes Landsat

Fuente: Elaboración propia, 2015

17.2 Imágenes de Radarsat 2

17.2.1 Georreferenciación.

Las imágenes Radarsat fueron entregadas por el Banco Nacional de imágenes (BNI) orto rectificadas. Por tal razón no fue necesario realizar este procedimiento.

17.2.2 Filtros de remoción de Speckle.

A las imágenes de Radarsat 2 a través del programa Erdas 2011, se les aplicó la remoción de Speckle o ruido, con la finalidad de eliminar el aspecto granular dado por las diferencias de magnitud de energía que son capturadas para cada pixel y así aumentar el

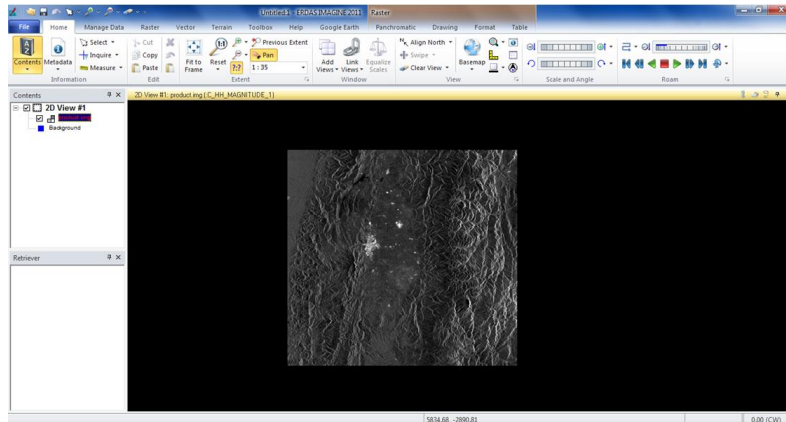
contraste en la imagen y facilitar la interpretación visual de los elementos que se están estudiando.

Tabla 11. Procedimiento remoción de Speckle

1. Importar la imagen de Radar a Erdas a través de la pestaña "Manage Data" se selecciona la opción "Import Data".

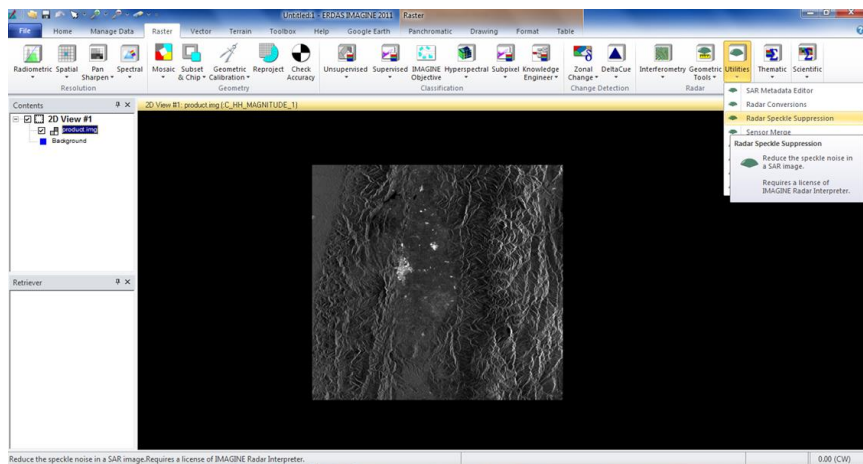


2. Se abre la imagen generada, luego de la importación en Erdas

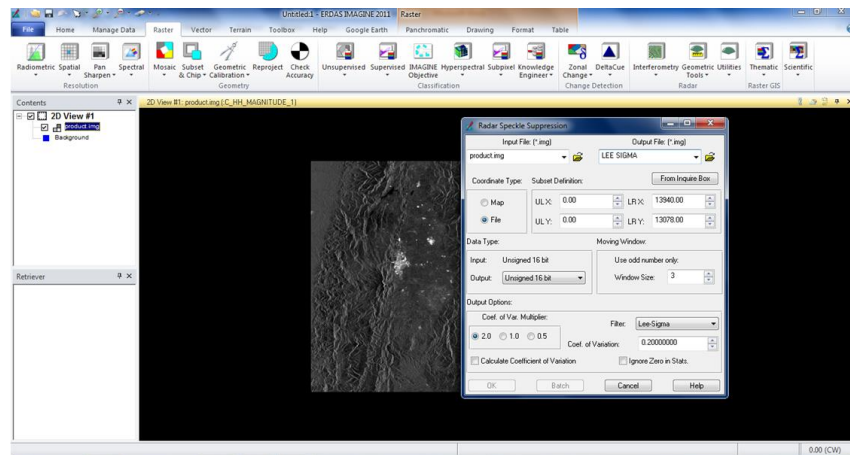


3. Luego se procede a realizar la remoción de speckle sobre la imagen que ha sido importada y ortorectificada.

Esta herramienta permite seleccionar distintos algoritmos usados para Remoción de Speckle, entre ellos se encuentra Mean, Median, Lee-Sigma, Local Region, Lee, Frost y Gamma – MAP. La siguiente figura presenta un resultado al aplicar uno de los algoritmos mencionados sobre la imagen.



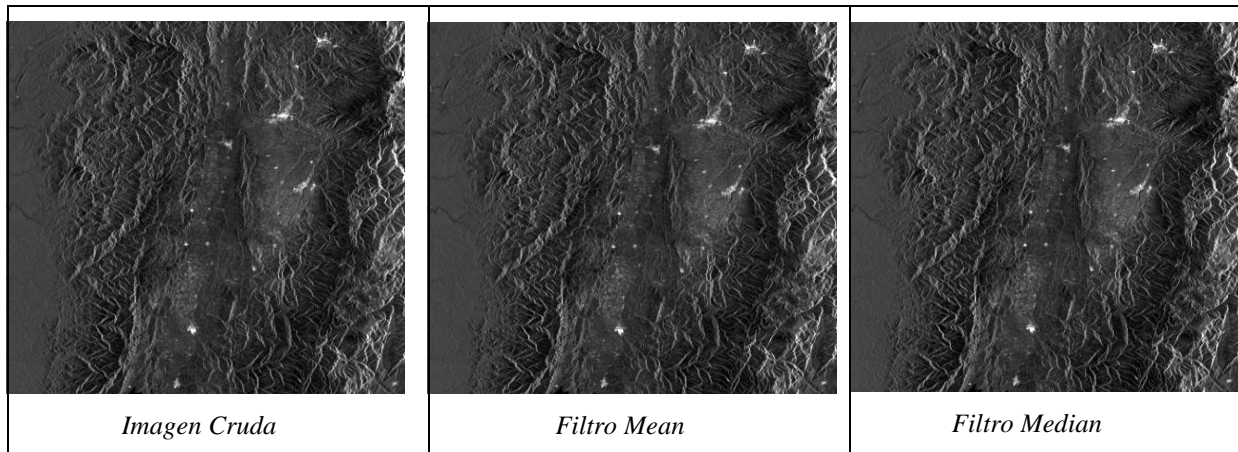
4. Se selecciona el filtro a aplicar y se guarda la imagen resultante.



Fuente: Propia., 2015

Los resultados de la aplicación de estos filtros son:

16.2.2.1 RS2_OK26322_PK264311_DK242715_WI_20110923_105615_HH_HV_SGF.



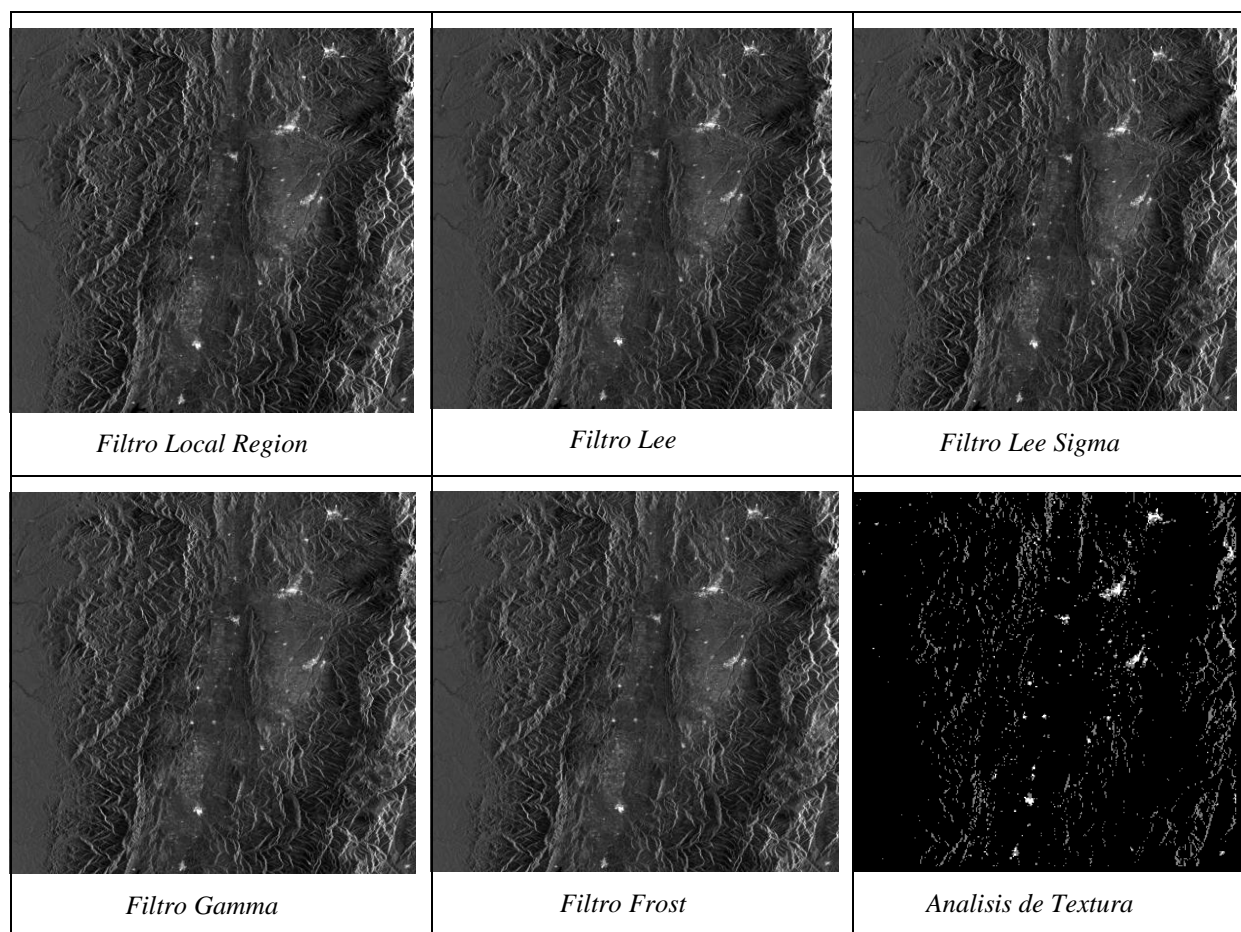


Figura 35. Filtros imagen Radarsat ,

RS2_OK26322_PK264311_DK242715_W1_20110923_105615_HH_HV_SGF.

Fuente: Elaboración propia, 2015

16.2.2

RS2_OK26322_PK264312_DK242716_W1_20110923_105636_HH_HV_SGF.

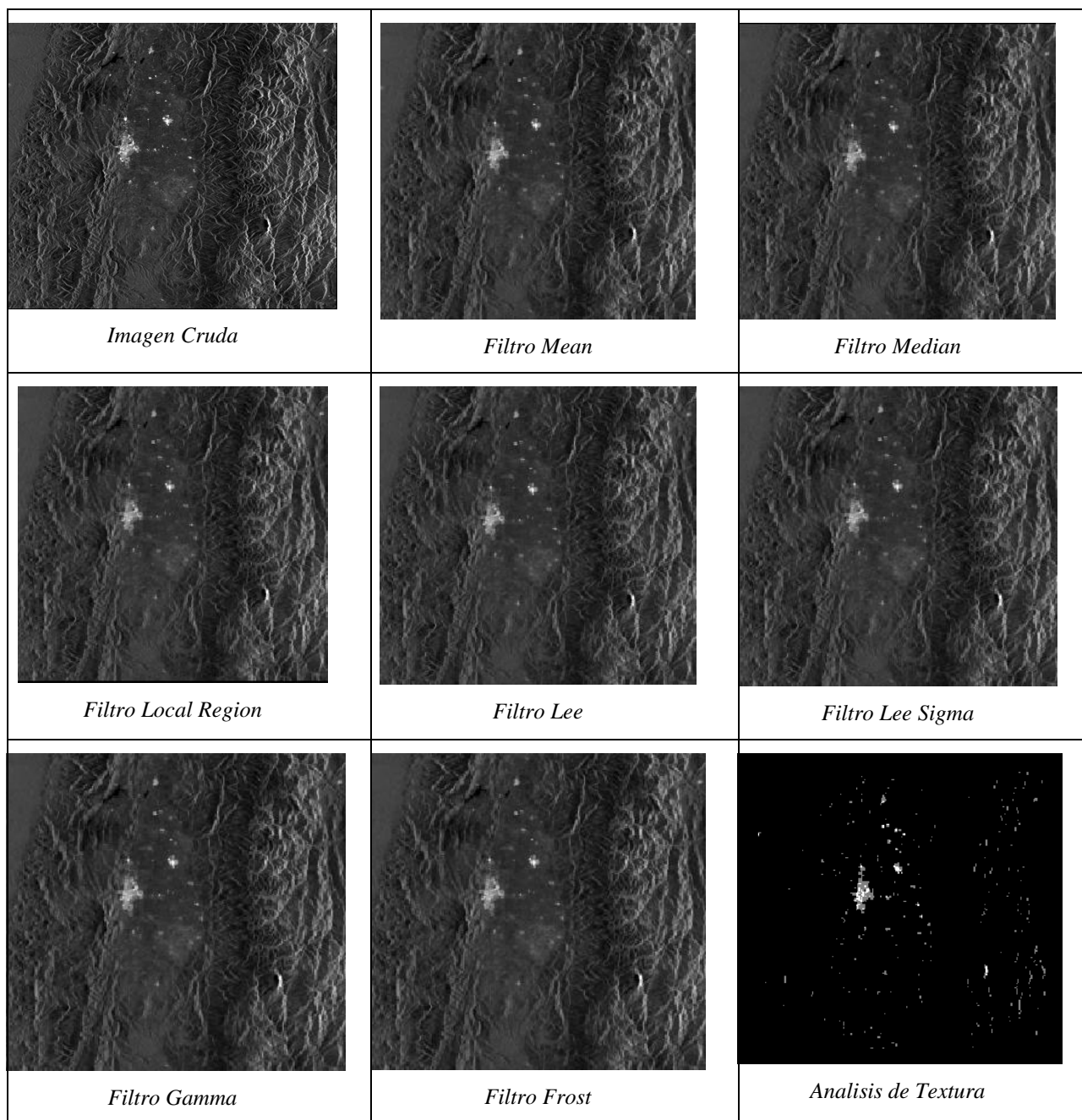


Figura 36. Filtros imagen Radarsat 2

RS2_OK26322_PK264312_DK242716_W1_20110923_105636_HH_HV_SGF.

Fuente: Elaboración propia, 2015

Una vez realizados los filtros y el análisis de textura se proceden a realizar la clasificación supervisada sobre todas las imágenes, eligiendo la de mejor resultado, la cual es la del Filtro Mean.

17.2.3 Elaboración de mosaico.

Una vez realizadas aplicados los filtros sobre las imágenes de Radarsat 2, se procedió a realizar los cortes de las imágenes conforme a la zona de estudio y a elaborar el mosaico entre las dos imágenes, con el comando Mosaic de ERDAS IMAGINE 2011, obteniendo el siguiente resultado:

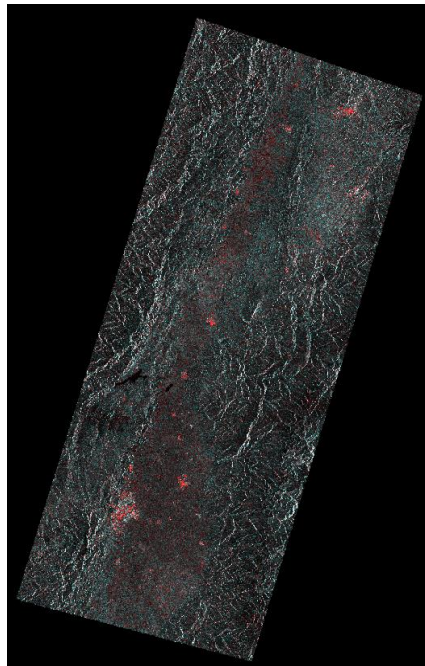


Figura 37 Mosaico de Radarsat 2

Fuente: Elaboración propia, 2015

18. Procesamiento de Imágenes:

18.1 Clasificación de Imágenes

Para la identificación de distintas coberturas en la imagen se determinaron las siguientes clases, conforme a la clasificación Corine Land Cover para Colombia:

Tabla 12. Metodología Corine Land Cover para Colombia

<i>Territorios Artificializados</i>	<i>1.1 Zonas Urbanizadas</i>	<i>1.1.1 Tejido urbano continuo</i> <i>1.1.2 Tejido urbano discontinuo</i>
	<i>1.2 Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación</i>	<i>1.2.1 zonas industriales o comerciales</i>
		<i>1.2.2 Red vial, ferroviarias y terrenos asociados</i>
		<i>1.2.3 Zonas portuarias</i>
		<i>1.2.4 Aeropuertos</i> <i>1.2.5 Obras Hidráulicas</i>
<i>1.4 Zonas verdes artificializadas, no agrícolas</i>	<i>1.4.1 Zonas verdes urbanas</i>	
	<i>1.4.2 Instalaciones recreativas</i>	
<i>Territorios Agrícolas</i>	<i>2.2 Cultivos permanentes</i>	<i>2.2.1 Cultivos permanentes herbáceos</i>
		<i>2.2.2 Cultivos permanentes arbustivos</i>
		<i>2.2.3 Cultivos permanentes arbóreos.</i>
	<i>2.3 Pastos</i>	<i>2.3.1 Pastos limpios</i>
		<i>2.3.2 Pastos arbolados</i> <i>Pastos enmalezados o enrastrados</i>
	<i>2.4 Áreas agrícolas heterogéneas</i>	<i>2.4.1 Mosaico de cultivos</i>
		<i>2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos</i>
<i>2.4.3 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales</i>		
<i>2.4.4 Mosaico de pastos con espacios naturales</i>		
<i>Bosque y áreas seminaturales</i>	<i>3.1 Bosques</i>	<i>3.1.1 Bosque natural denso</i>
		<i>3.1.2 Bosque abierto</i>

		3.1.3 Bosque natural fragmentado
		3.1.4 Bosque de galería
		3.1.5 Bosque plantado
		3.3.1 Zonas arenosas naturales
		3.3.2 Afloramientos rocosos
	3.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación.	3.3.3 Tierras desnudas y degradadas
		3.3.4 Zonas quemadas
		Zonas glaciares y nivales
		5.1.1 Ríos (50 m)
Superficies de agua	5.1 Aguas Continentales	5.1.2 Lagunas, Lagos y ciénagas naturales
		5.1.3 Canales
		5.1.4 Embalses y cuerpos de agua
	No clasificado	Incluye al resto de los píxeles que no tienen ninguna de las características de las clases de arriba

Fuente: IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land COVER adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D.C: 72 pp.

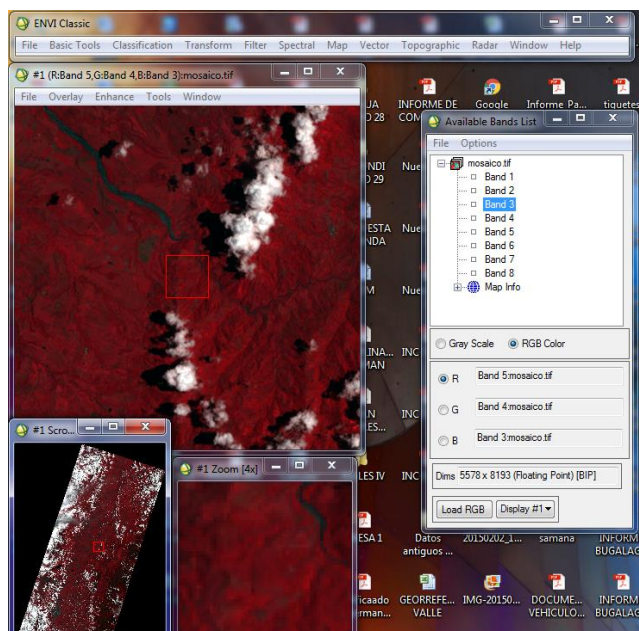
La determinación de las clases sobre los mosaicos de las imágenes Landsat se realizó a través del método del módulo de Clasificación supervisada por el método de Maximun Likelihood. La elección del tipo de clasificación se basó en pruebas repetidas con otros tipos de clasificación supervisada y fue el tipo con los mayores valores de exactitud (en los Anexos se adjuntan las matrices de confusión).

Para la clasificación supervisada se usaron como verdad de campo, muestras de áreas representativas de cada clase (aproximadamente más del 2% del área total de la clase) seleccionadas a partir de ROIs identificados con información de los estudios de uso y cobertura de la Tierra realizado por el IGAC para los años 1999 y 2012, además del apoyo

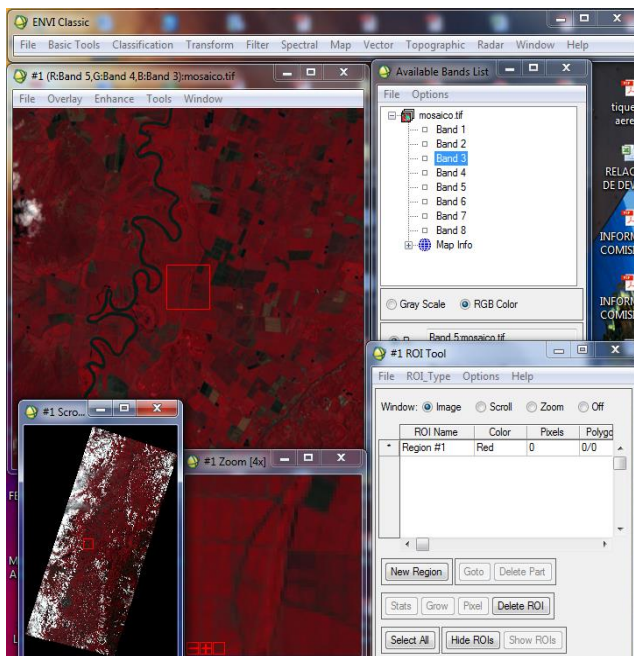
con imágenes de Google Earth e información tomada en campo para la validación de la imagen 2014.

Tabla 13. Procedimiento Clasificación Supervisada

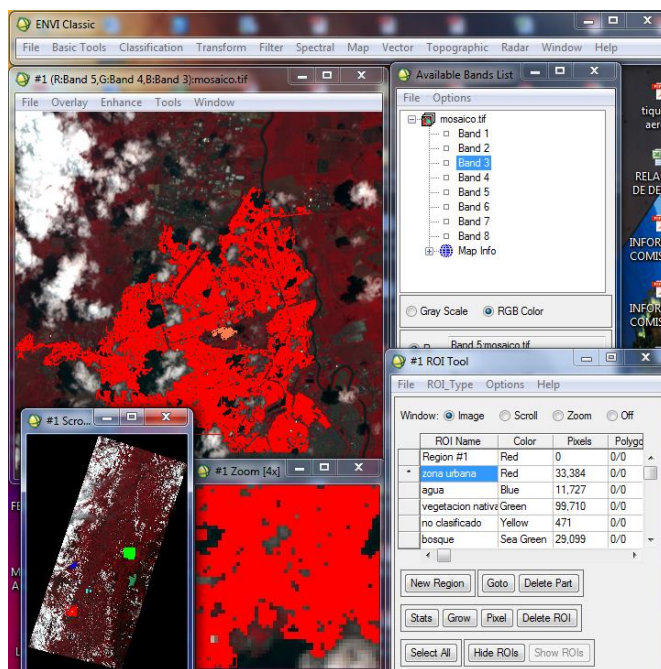
1. Se abre el mosaico de Landsat en Envi 5.3.



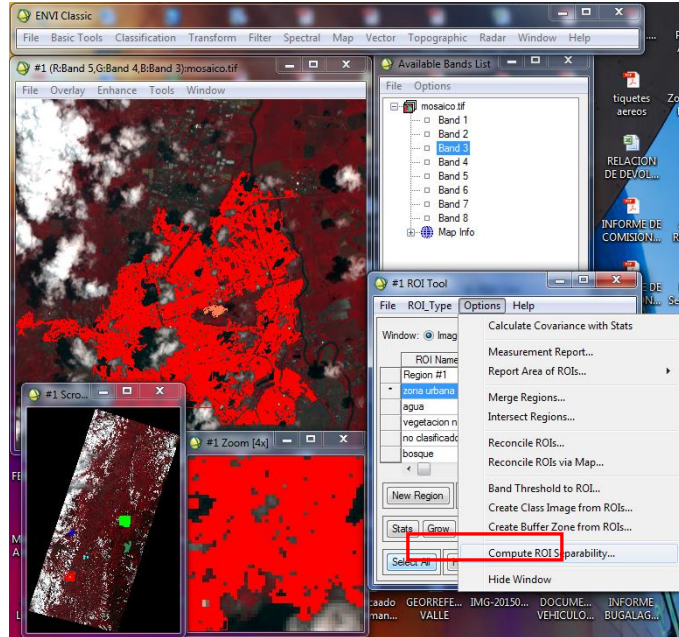
2. A través de la herramienta ROI Tool se inicia la generación de los ROIS de cada cobertura que se desea identificar en la imagen



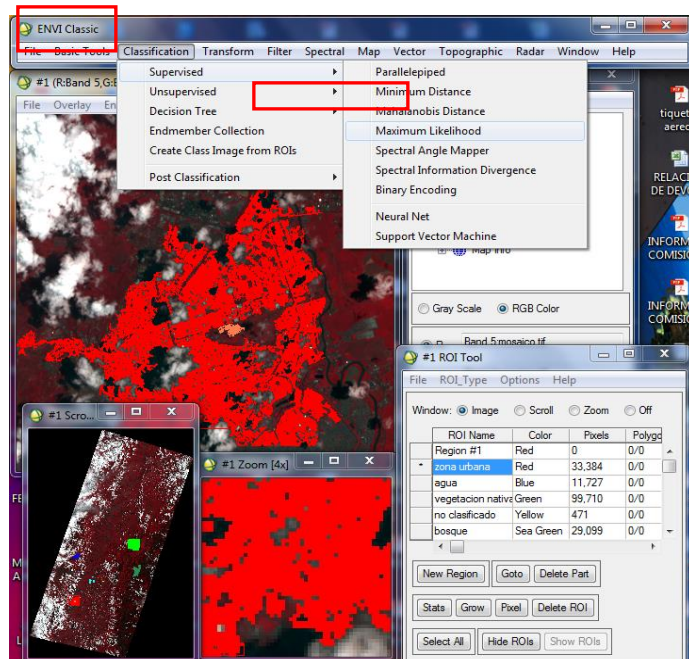
3. Se generan las muestras de todas las coberturas que se quieren identificar en la imagen



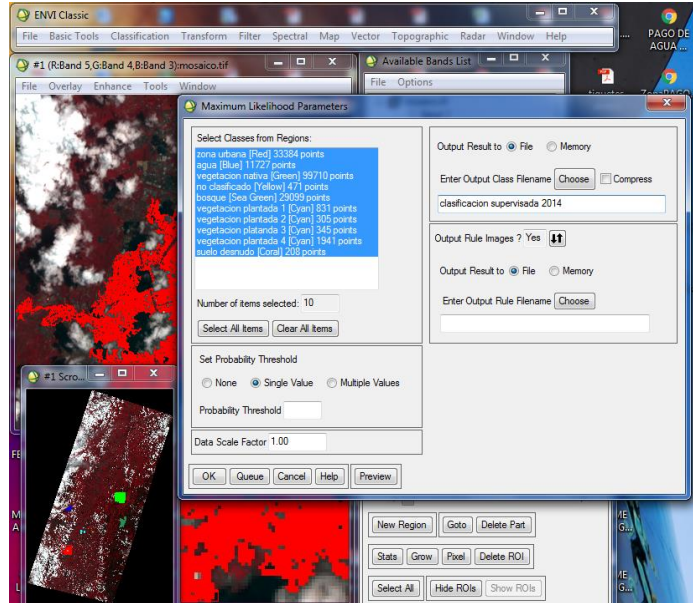
4. Una vez generadas las muestras o los ROIS, se les calcula su separabilidad, con la finalidad de comprobar el grado de discriminación entre estas sobre la imagen. Para mayor identificación de estas sobre la imagen, lo ideal es que estos valores estén entre 1.99 y 2.0



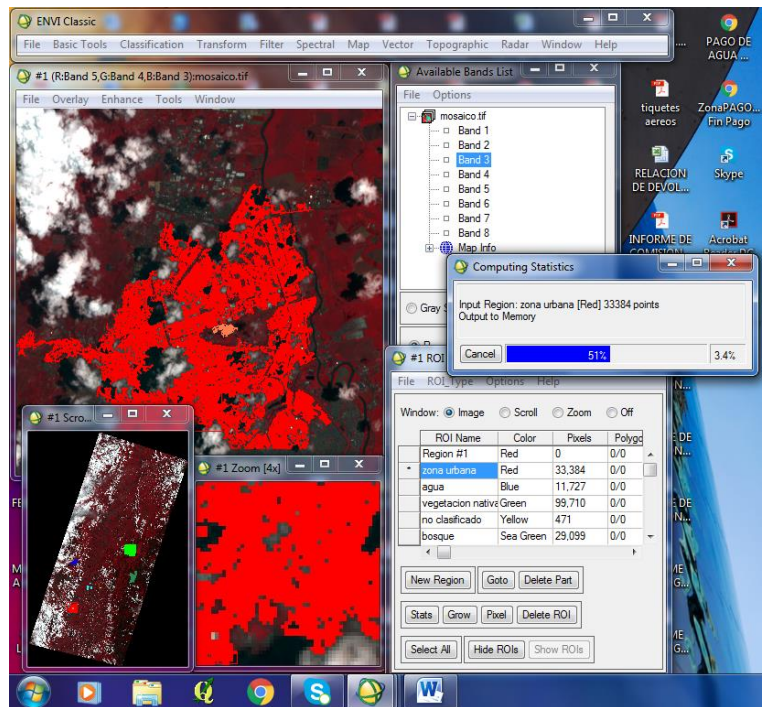
5. En el menú de Classification se elige Supervised y el método de clasificación que se desea aplicar, para nuestro caso se selecciona Maximum Likelihood.



6. Luego se elige en el programa con que clases o ROIS se va a clasificar la imagen y se le da la ruta de almacenamiento de la imagen resultante.



7. Una vez ejecutado el paso anterior se da click en OK y el sistema inicia la generación de la clasificación. El resultado de este proceso es la imagen clasificada supervisadamente.



18.1.1 Landsat año 1999

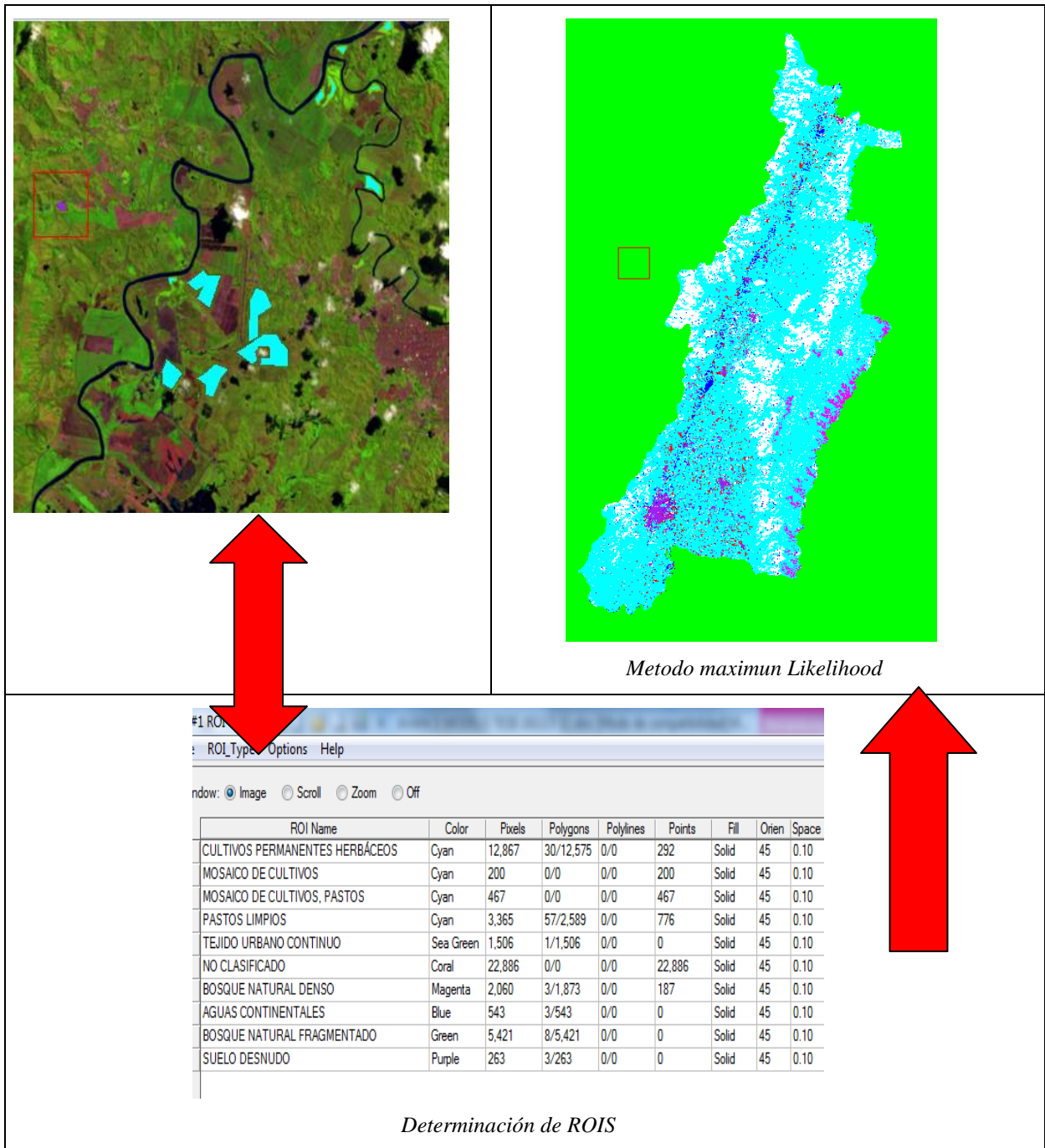


Figura 38. Clasificación Supervisada Landsat 1999

Fuente: Propia 2015

18.1.2 Landsat año 2008

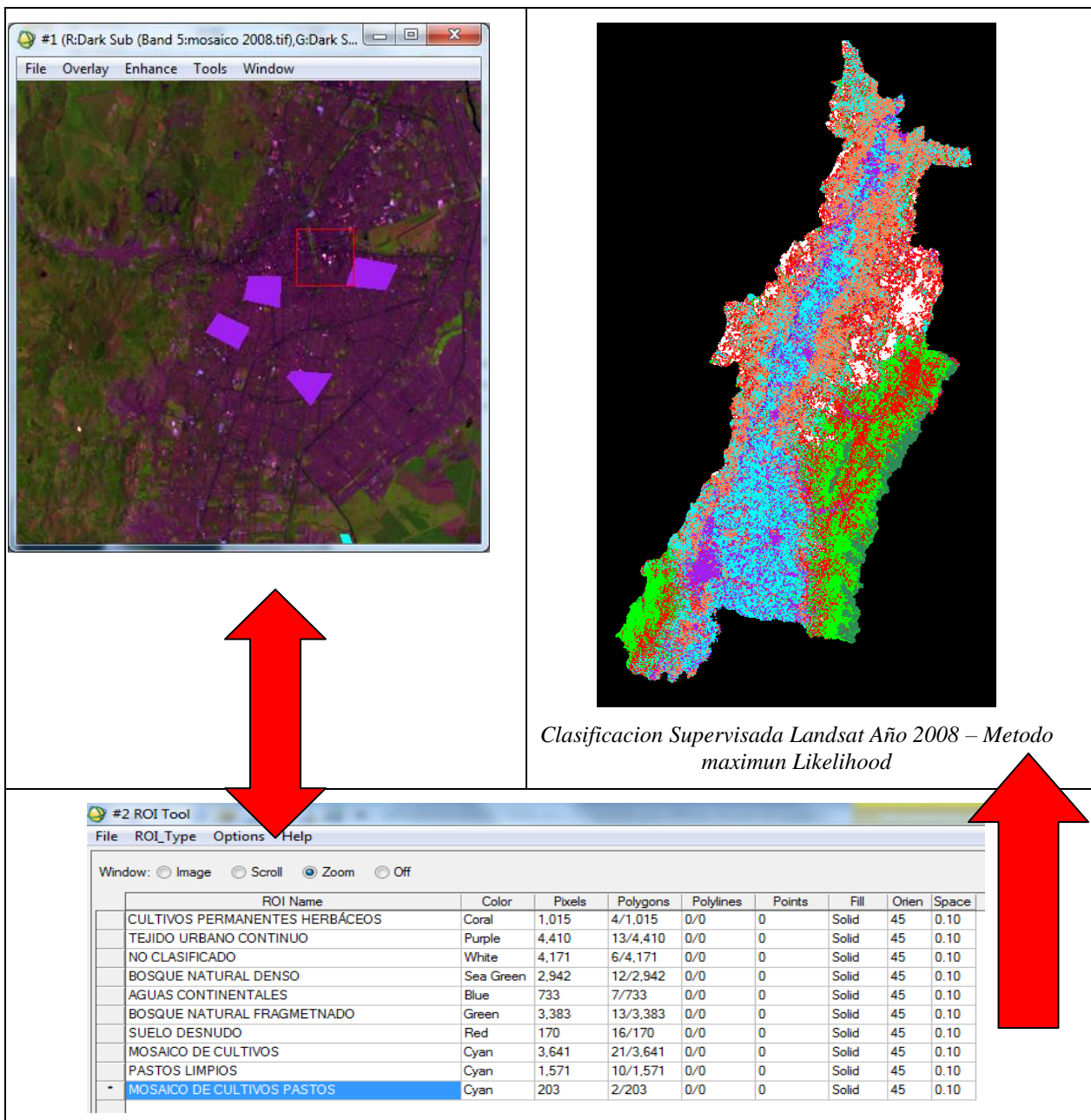


Figura 39. Clasificación Supervisada Landsat 2008

Fuente: Propia 2015

18.1.3 Landsat ano 2014

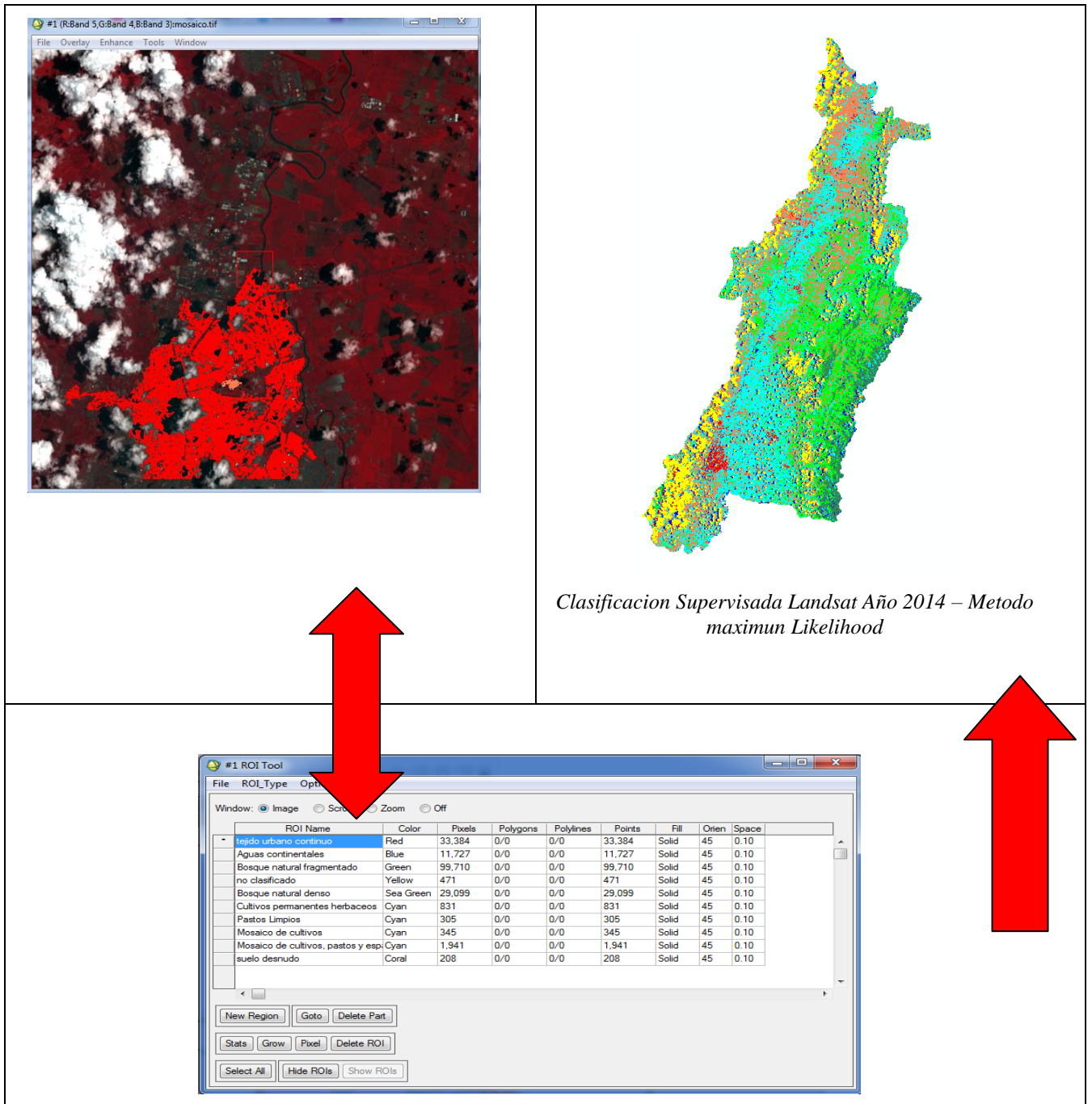


Figura 40. Clasificación Supervisada Landsat 2014

Fuente: Propia 2015

18.1.4 Radarsat 2

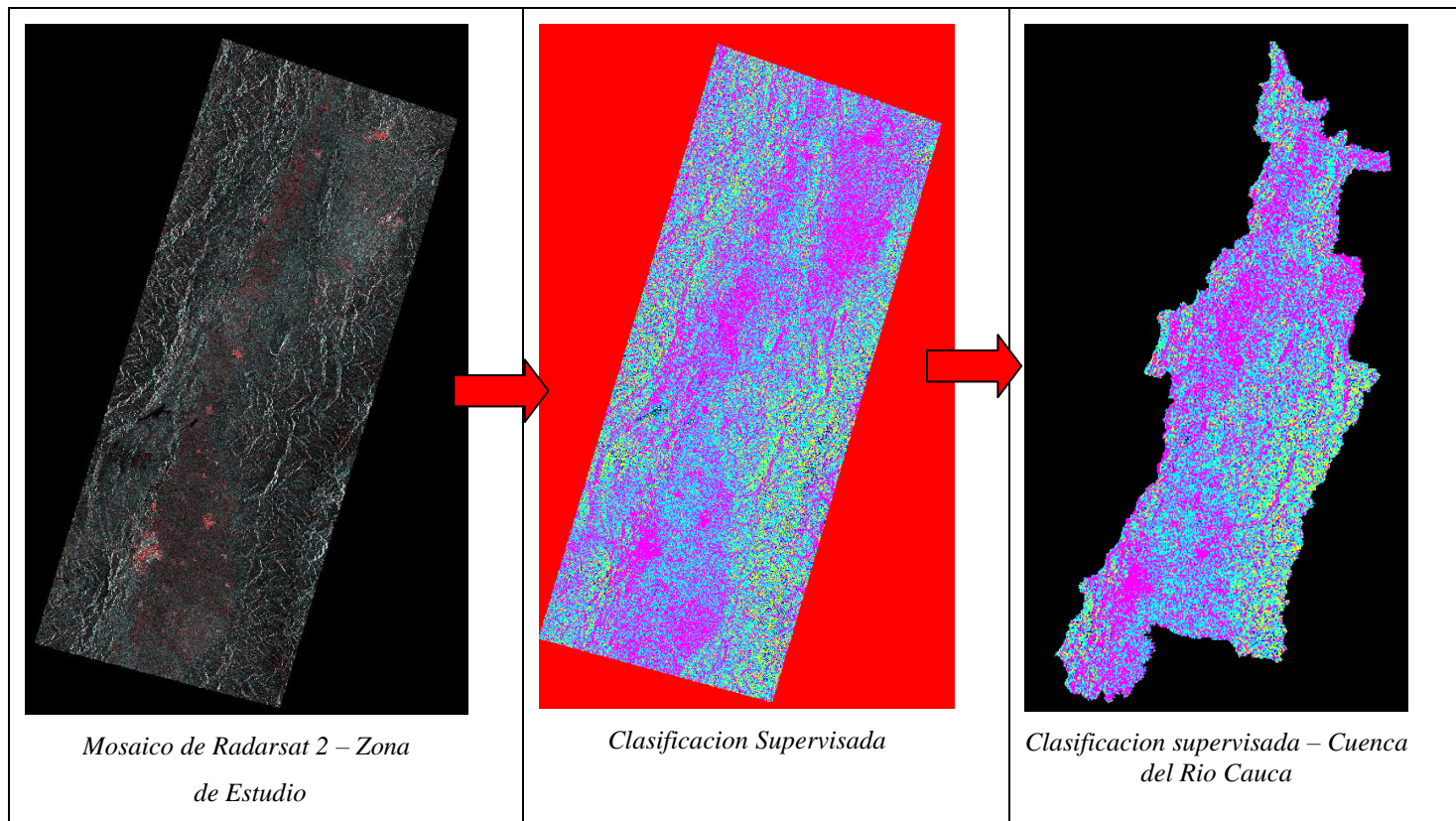


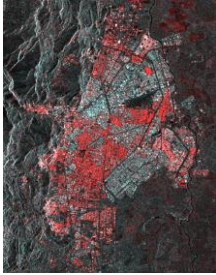
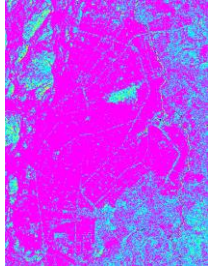
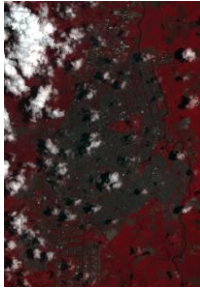
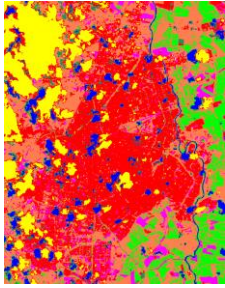
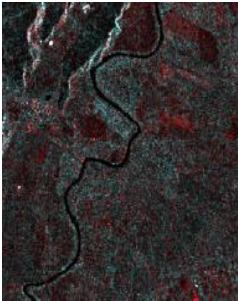
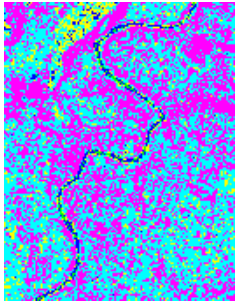


Figura 41. Clasificación Supervisada Radarsat 2

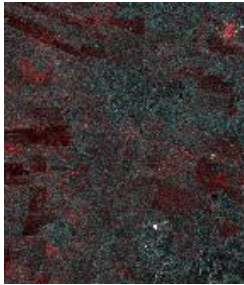
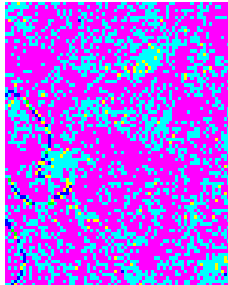
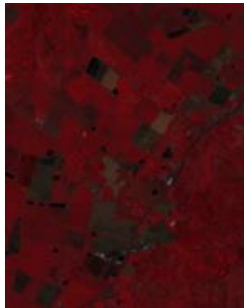
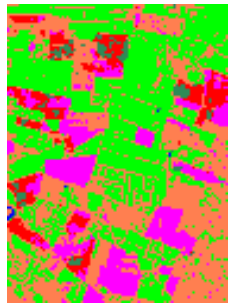
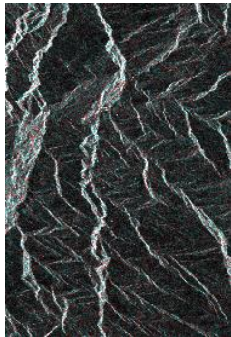
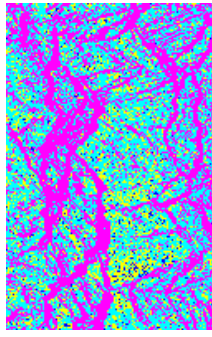
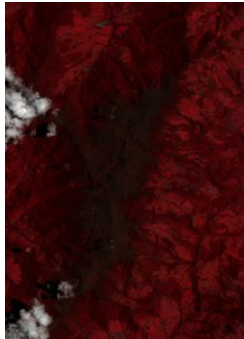
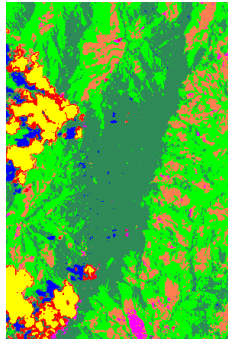
Fuente: Propia 2015

18.2 Validación de las imágenes ópticas (Landsat) en relación con la Radarsat 2

Una vez realizada la clasificación supervisada de las dos imágenes de Radarsat, se logró realizar la comprobación de las coberturas identificadas en las 3 imágenes Landsat, como, por ejemplo:

Tabla 14. Imagen Landsat 2014 vs Radarsat 2

<i>Cobertura</i>	<i>Sensor</i>	<i>Imagen Cruda</i>	<i>Imagen Clasificada</i>
<i>Zona Urbana</i>	<i>Radarsat 2- año 2011</i>		
	<i>Landsat 2014-RGB 543</i>		
<i>Agua</i>	<i>Radarsat 2- año 2011</i>		
	<i>Landsat 2014-RGB 543</i>		

<i>Cobertura</i>	<i>Sensor</i>	<i>Imagen Cruda</i>	<i>Imagen Clasificada</i>
<i>Vegetación artificial</i>	<i>Radarsat 2- año 2011</i>		
	<i>Landsat 2014-RGB 543</i>		
<i>Vegetación Nativa – Relieve</i>	<i>Radarsat 2- año 2011</i>		
	<i>Landsat 2014-RGB 543</i>		

Fuente: Propia, 2015

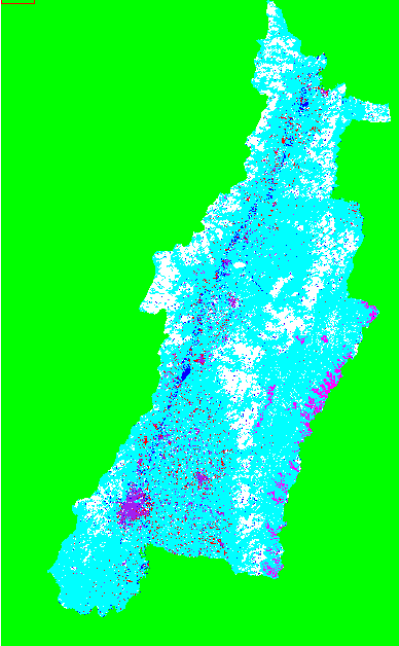
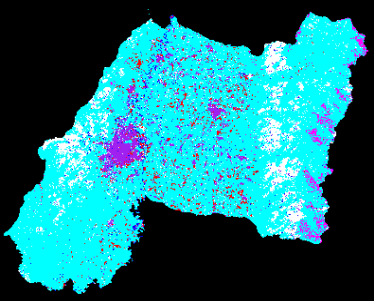
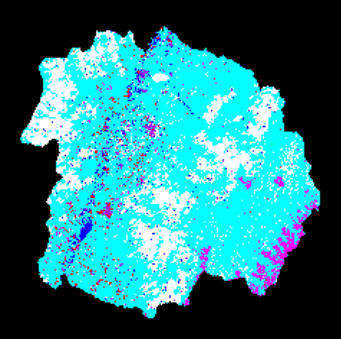
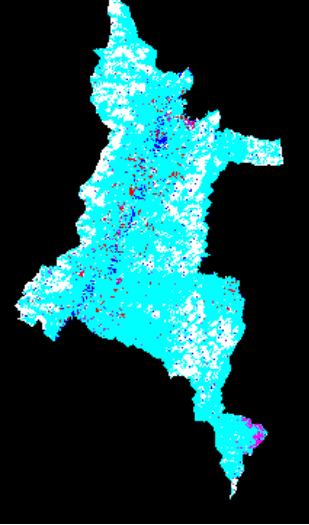
Una vez analizados los resultados, se puede concluir que las imágenes de Radarsat 2 son fundamentales en la identificación de drenajes, delimitación de zona urbana y determinación de zonas montañosas. Sin embargo, no ofrecen mucha utilidad en la discriminación de cultivos.

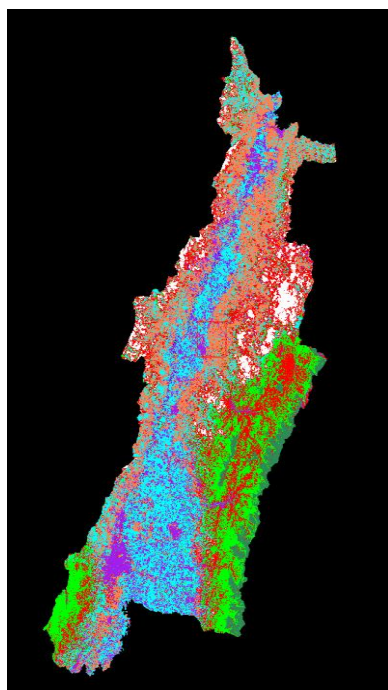
Por lo anterior, para el cálculo de los índices se toma la determinación de trabajar con la información obtenida de las 3 imágenes ópticas del sensor Landsat.

19. Post-procesamiento: Cuantificación de coberturas en imágenes clasificadas

Por medio de la herramienta estadística de Clases de ENVI se cuantificó el área de cada cobertura, por cada zona de trabajo sobre las imágenes Landsat.

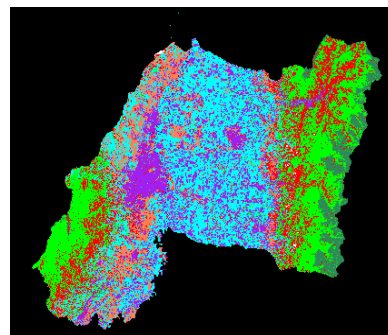
Tabla 15. Clasificación supervisada por zonas de trabajo

Tipo de Imagen	Zona de trabajo	Clasificación
	Sur	
Landsat 1999	Centro	
	Norte	

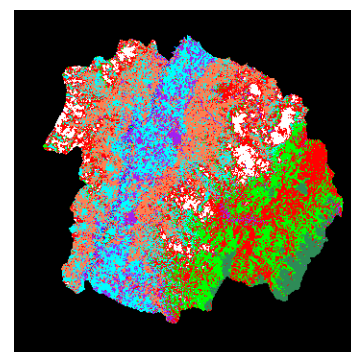


Landsat 2008

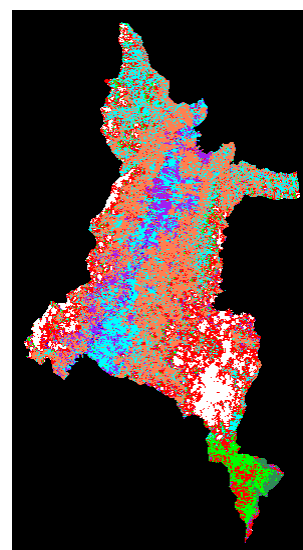
Sur

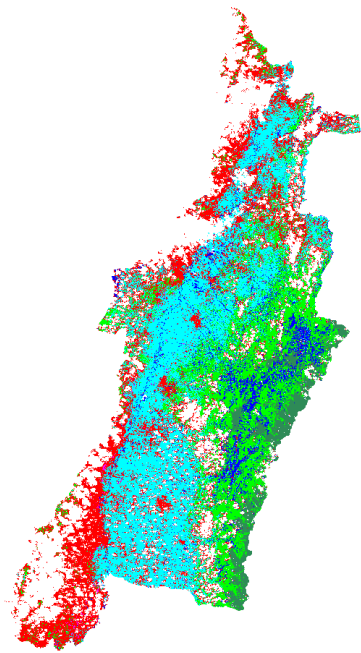


Centro



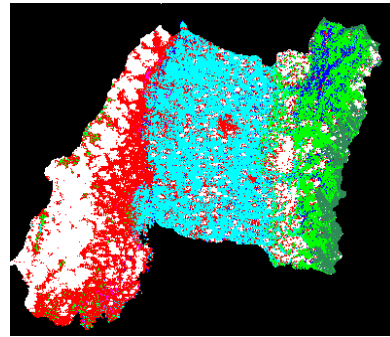
Norte



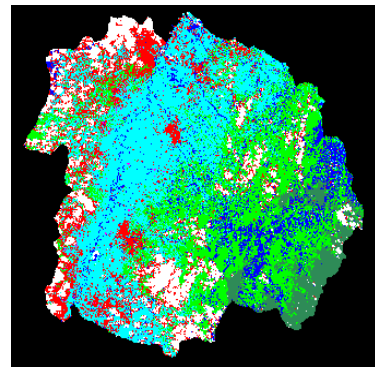


Landsat 2014

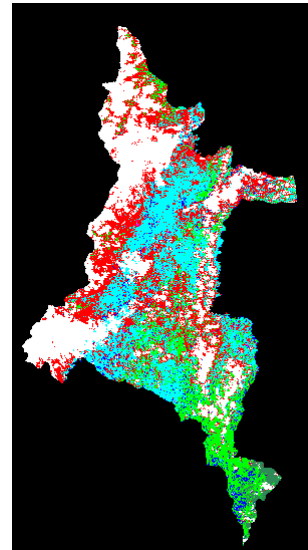
Sur

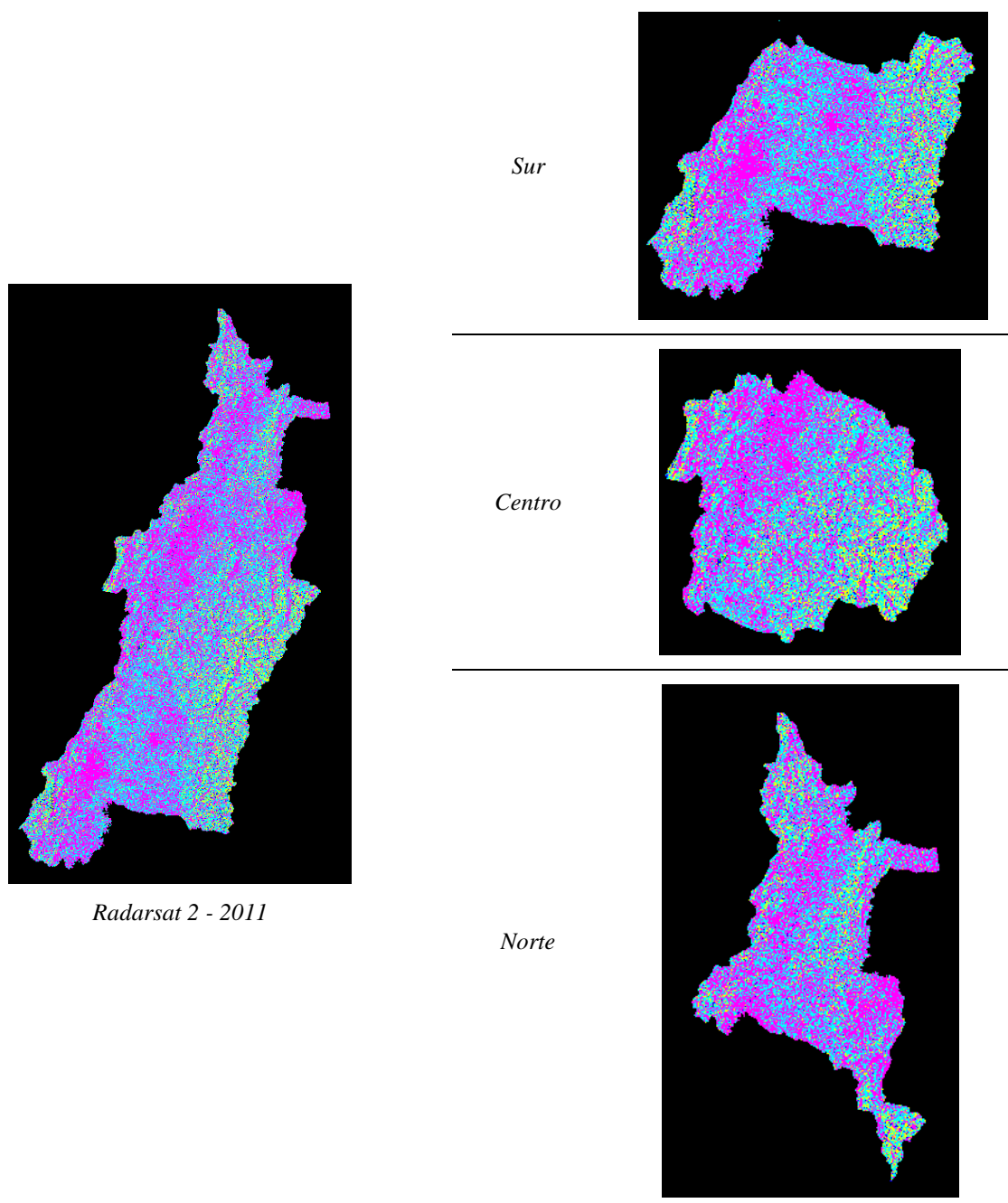


Centro



Norte





Fuente: Propia, 2015

Para realizar el cálculo del área para cada uno de los sectores de la Cuenca se siguió el siguiente procedimiento; a partir del uso de máscaras de cada sector de la Cuenca aplicadas a la imagen clasificada se determine el área para cada cobertura usando la

herramienta estadística del software ENVI 5.3 Class statistics ubicado en el panel de postclasificación – class statistics.

Tabla 16. Calculo de áreas

<i>Area en (Has)</i>					
<i>AÑO</i>	<i>ZONA DE TRABAJO</i>	<i>Agua</i>	<i>Vegetación Natural</i>	<i>Zona urbana</i>	<i>Vegetación Artificial</i>
1999	<i>Zona Sur</i>	5380.65	6964.47	29177.1	311365.62
	<i>Zona Centro</i>	7191	9831.6	10467.72	258664.41
	<i>Zona Norte</i>	5363.55	2281.32	7040.25	213166.44
2008	<i>Zona Sur</i>	5513,31	111587,67	123356,61	153778,77
	<i>Zona Centro</i>	15214,68	67881,78	113960,79	155431,53
	<i>Zona Norte</i>	16215,21	17222,67	76355,73	159691,77
2014	<i>Zona Sur</i>	15588,18	70288,11	94775,85	112517,82
	<i>Zona Centro</i>	51179,58	186552,72	146975,4	237258,27
	<i>Zona Norte</i>	60474,06	229655,07	222582,51	311994,09

Fuente: Propia, 2015

19.1 Exactitud de la Clasificación.

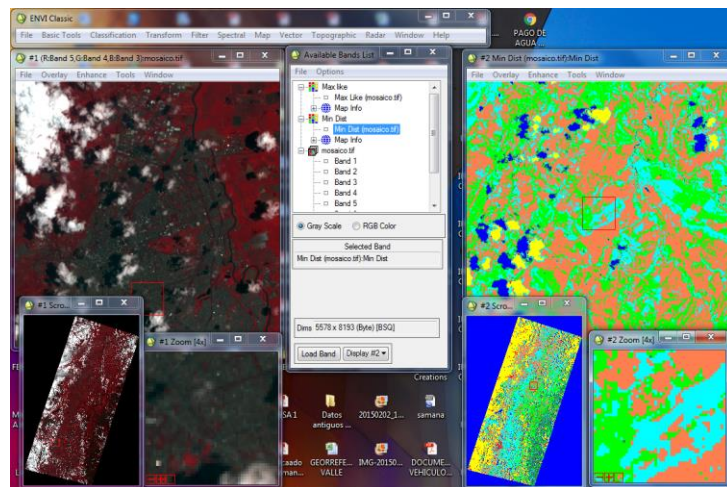
Una vez se determinaron los ROIs a utilizar para realizar la clasificación supervisada se hizo el cálculo del porcentaje de separabilidad entre ellos, procurando que estos estuviesen entre el 1.99 y 2.00.

Así mismo, para evaluar la precisión del producto de la clasificación y validar que las clases incluyan realmente el área correspondiente se realizó la Matriz de Confusión para los años: 1999, 2008 y 2014. Este método consiste básicamente en: (1) conocer la exactitud

de la clasificación comparando muestras de píxeles en la imagen original (imagen realidad)⁴⁴ con los correspondientes de la imagen clasificada y cuantificar la exactitud en porcentaje de píxeles clasificados correctamente dentro de esa clase, los faltantes (por error de omisión, es decir, aquellos píxeles que el método de clasificación no incluyó correctamente a la clase a la que pertenecen) y los sobrantes (por error de comisión, es decir, aquellos píxeles que pertenecen a otra clase). Las matrices de confusión de cada imagen se muestran en los anexos del presente trabajo.

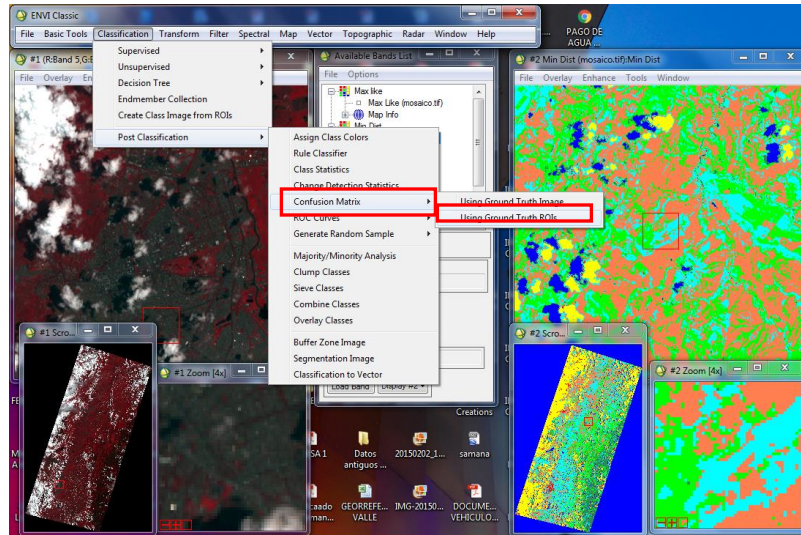
Tabla 17. Procedimiento para obtener matriz de confusión

1. Una vez generada la clasificación supervisada, se procede a abrir el archivo en Envi 5.3.

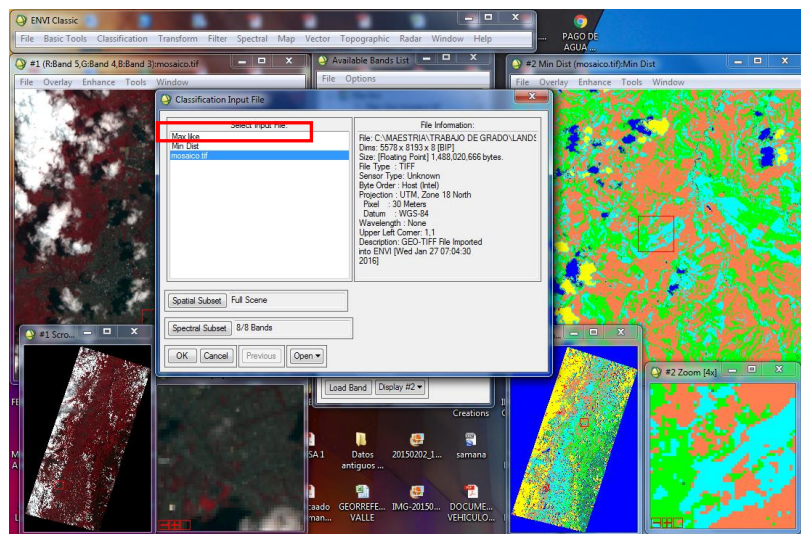


⁴⁴ Las imágenes Landsat 1999 y 2008 se comprobaron con los estudios de uso y cobertura realizados por el IGAC en los años 1999 y 2012.

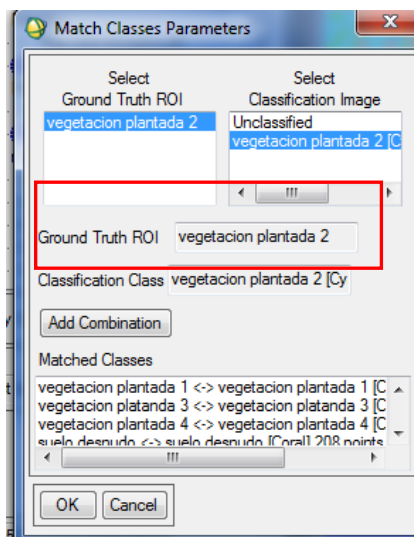
2. Por medio de la herramienta de Post Classification se da click en Confusion Matriz usando ROIS verdad (muestras de coberturas tomadas de información secundaria o a través de visitas de campo a la zona de trabajo). Los ROIS verdad deben encontrarse subidos al sistema antes de realizar la matriz de confusión.



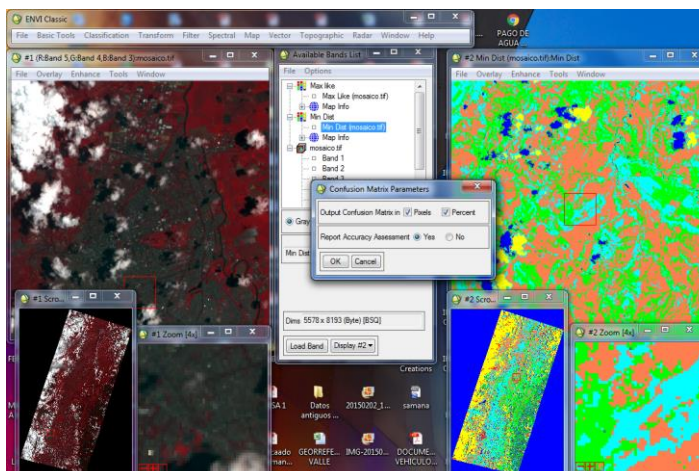
3. Luego se elige el archivo de la clasificación supervisada a la que se le va generar la matriz de confusión.



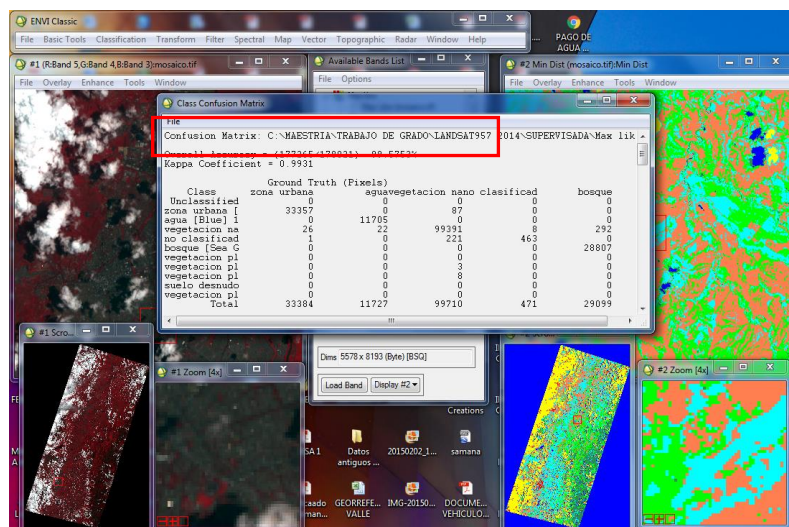
4. Se realiza la elección por parejas en el sistema de los ROIs utilizados para la clasificación con los ROIs verdad.



5. Al dar click en OK el programa inicia la generación de la matriz de confusión



6. Por último, el sistema genera la matriz de confusión.



Fuente: Propia 2015

A continuación se presentan los resultados del coeficiente Kappa y el promedio de exactitud de la clasificación supervisada validada a partir de la matriz de confusión, el producto de este se encuentra en los anexos.

Tabla 18. Promedio de exactitud- Coeficiente Kappa

AÑO	PROMEDIO DE EXACTITUD	COEFICIENTE KAPPA
1999	95,89%	0,95
2008	93,57%	0,80
2014	97,88%	0,97

Fuente: Propia, 2015

19.2 Elaboración de mapas de uso y cobertura

Para el cálculo de los indicadores de vegetación, demográfico y cambio de cauce, se hizo necesario reclasificar las imágenes raster producto de las clasificaciones supervisadas y obtener las siguientes clases:

Tabla 19. Clases reclasificación vs Clases Corine Land Cover

<i>Clases (Reclasificación)</i>	<i>Clases (Corine Land Cover)</i>
<i>Agua</i>	<i>Agua</i>
<i>Vegetación Natural o autóctona</i>	<i>Vegetación Natural o autóctona</i>
<i>Vegetación Artificial y zonas de intervención del hombre</i>	<i>Vegetación artificial, plantada o alóctona</i>
<i>Área Urbana</i>	<i>Área Urbana</i>
<i>No Clasificada</i>	<i>No Clasificada</i>

Fuente: Propia, 2015

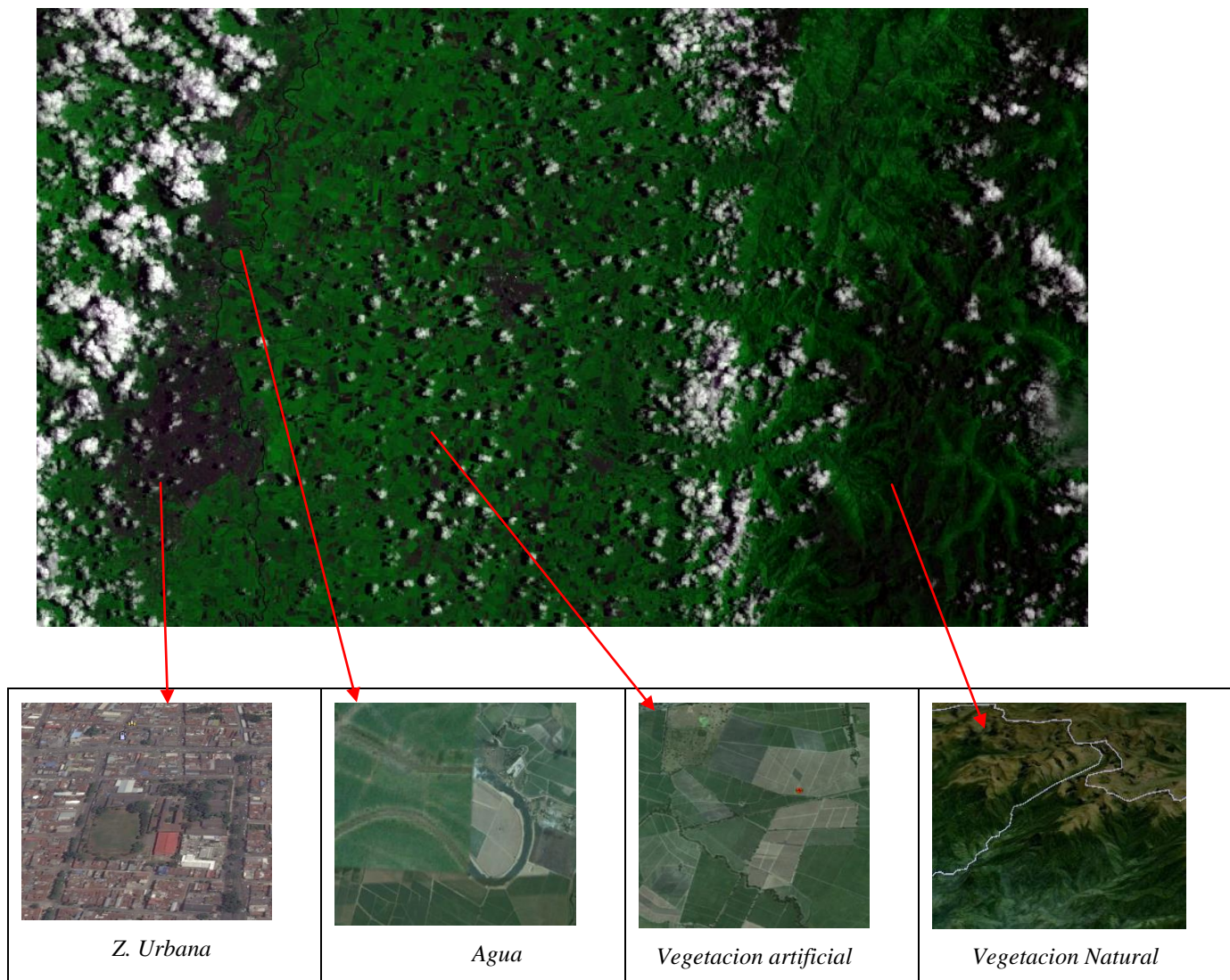


Figura 42. Coberturas para Cálculo de los índices

Fuente: Propia 2015

Es como luego de aplicar el proceso de reclasificación con la herramienta Reclassify de Arcgis 10.3.1, Posterior a obtener la reclasificación se procede a vectorizar (con la herramienta From Raster to Polygon), generalizando este resultado para elaborar los mapas de la clasificación supervisada, los cuales se muestran a continuación:

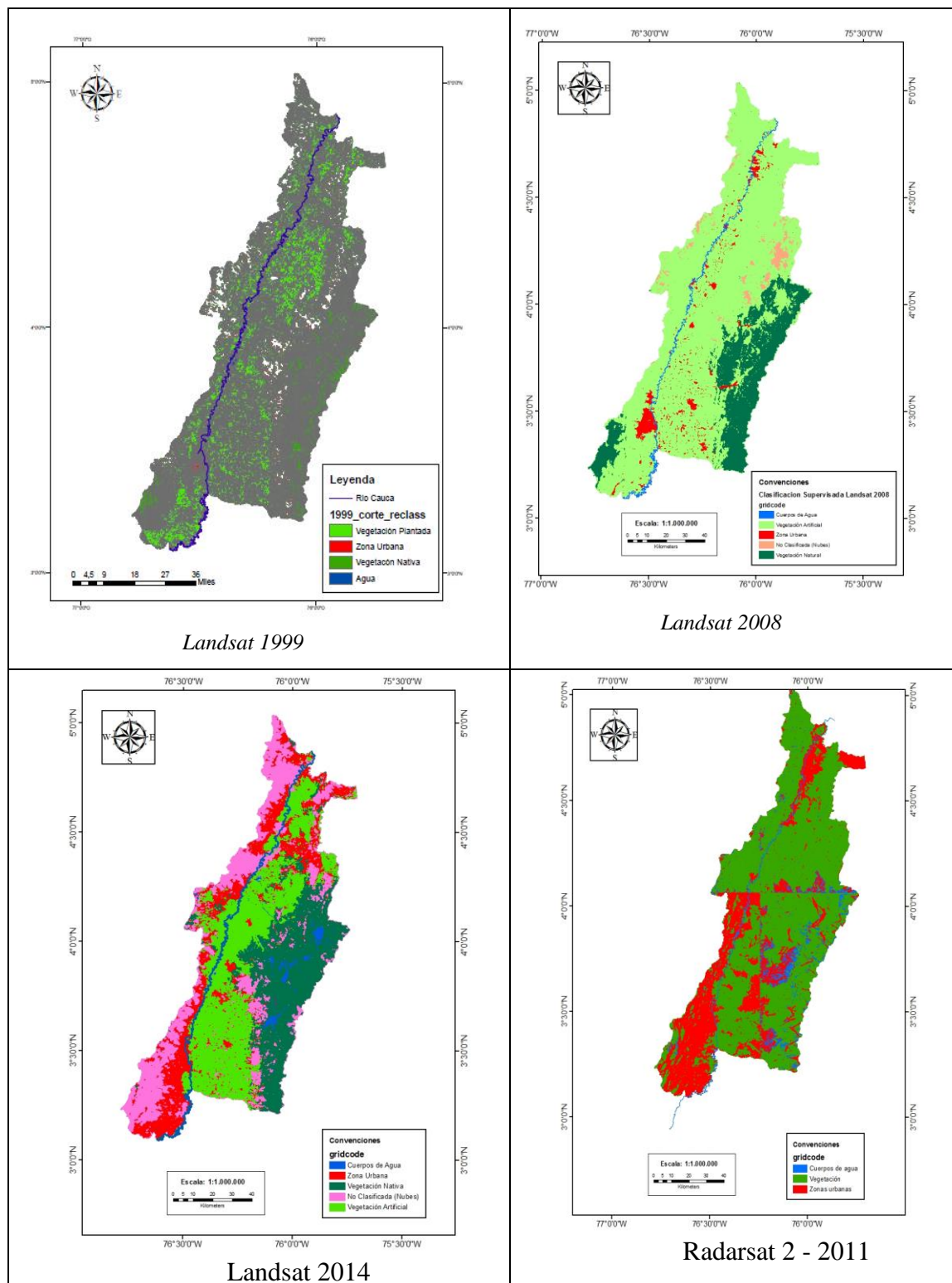


Figura 43. Mapas finales de Cobertura

Fuente: Propia 2015

Capítulo 5

Estimación de Indicadores

La determinación de un indicador que represente la incidencia antrópica que ha tenido los asentamientos y actividades realizadas a lo largo de la cuenca del Río Cauca en el departamento del Valle requiere la obtención de datos históricos, lo cual se convierte en una restricción para obtener un índice predictivo más completo, por ello se determina el uso de imágenes Landsat como insumo principal de información espacial teniendo en cuenta la disponibilidad de imágenes en diferentes etapas de desarrollo del territorio; al hacer la revisión bibliográfica de estudios previos de la generación de índices de calidad ambiental a través de información cartográfica no se encontró información para el área objeto de estudio, la mayoría de los estudios realizados por entidades como la Corporación Autónoma Regional del Valle y la Universidad del Valle se basan específicamente en la determinación índices de calidad de agua y de demanda del recurso a partir de análisis físico químicos de calidad de agua y relación con actividades productivas en la región.

Para desarrollar el presente índice se tomó como referencia el estudio realizado en el año 2011 por la Universidad de Córdoba en Buenos Aires Argentina, donde se aplica el índice de incidencia antrópica a partir del análisis multitemporal de la cobertura vegetal, los cambios latentes en el cauce del Río Matanza – Riachuelo y el comportamiento de los asentamientos humanos, dando como resultado la determinación de un índice que permite conocer el grado de impacto que ha generado las prácticas productivas y de crecimiento poblacional a lo largo de la cuenca.

A continuación se presenta la estimación del indicador demográfico, de vegetación y de diseño de cauce para la cuenca del Río Cauca en el Valle del Cauca

20. Indicador Demográfico

Para la obtención de la información demográfica se recurrió a los datos de los censos poblacionales de los municipios que conforman la Cuenca Hidrográfica del Río Cauca en el Departamento del Valle se obtuvieron de la información censal publicada por el Departamento Nacional de Estadística – DANE - .

Para calcular el indicador demográfico se relaciona la información poblacional de los municipios que conforman la cuenca y sus áreas para establecer la densidad poblacional; posteriormente se hace un análisis estadístico de los valores y se modela el crecimiento poblacional para cada municipio y así estimar la población en años intercensales y conocer la tendencia en el crecimiento poblacional. Este proceso se realiza con el programa estadístico Minitab, el cual cuenta con las herramientas necesarias para el procesamiento de la información a través de análisis de regresión.

En muchos proyectos de diferente tipo es necesario tener datos de la población a la cual se le realiza el estudio, uno de ellos son los datos demográficos de población, estos datos están disponibles en las páginas de DANE con estos datos se puede predecir y analizar un comportamiento de crecimiento de la población.

La determinación del caudal necesario para una población o núcleo, depende del número de habitantes y la producción industrial que tendrá la localidad. Cuando los factores

crecen así mismo lo hará el consumo hídrico y el impacto generado sobre la Cuenca hidrográfica.

Los factores más importantes que influyen en el crecimiento de la población son los nacimientos, las muertes y las migraciones de población (aumento o disminución).

Dentro de las variables necesarias para calcular el indicador demográfico se encuentra la capacidad de carga K_p la cual corresponde a la población que puede albergar la totalidad de los municipios para su cálculo se procede a hallar el crecimiento poblacional, para ello se utilizó el método exponencial o logarítmico el cual tiene como base conocer al menos tres censos poblacionales de la zona de influencia, con esto se halla la tasa promedio de crecimiento de la población mediante las siguientes ecuaciones.

$$\ln P_2 - \ln P_1 = K (t_2 - t_1)$$

$$K = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{T_2 - T_1}$$

El cual K es la tasa de crecimiento de la población que se calcula como el promedio de las tasas para cada par de censos, P_2 y P_1 son las poblaciones de los años t_2 y t_1 obtenidas de la información existente.

A continuación, se presenta la población total de los municipios que conforman la Cuenca Hidrográfica, para los años en estudio:

Tabla 20. Población de la cuenca hidrográfica

<i>MPIO</i>	<i>TOTAL</i>			<i>CABECERA</i>			<i>RURAL</i>		
	<i>1999</i>	<i>2008</i>	<i>2014</i>	<i>1999</i>	<i>2008</i>	<i>2014</i>	<i>1999</i>	<i>2008</i>	<i>2014</i>
<i>Cali</i>	<i>1.974.7</i>	<i>2.194.7</i>	<i>2.344.7</i>	<i>1.937.6</i>	<i>2.158.1</i>	<i>2.308.1</i>	<i>37.11</i>	<i>36.6</i>	<i>36.6</i>
<i>Alcalá</i>	<i>16.20</i>	<i>18.58</i>	<i>20.9</i>	<i>8.512</i>	<i>9.9</i>	<i>11.2</i>	<i>7.7</i>	<i>8.7</i>	<i>9.7</i>
<i>Andalucía</i>	<i>20.02</i>	<i>18.0</i>	<i>17.83</i>	<i>13.52</i>	<i>14.29</i>	<i>14.61</i>	<i>6.49</i>	<i>3.70</i>	<i>3.21</i>
<i>Ansermanuevo</i>	<i>24.09</i>	<i>20.32</i>	<i>19.66</i>	<i>10.45</i>	<i>12.33</i>	<i>13.13</i>	<i>13.6</i>	<i>7.92</i>	<i>6.53</i>
<i>Bolívar</i>	<i>16.86</i>	<i>14.75</i>	<i>13.65</i>	<i>4.426</i>	<i>3.640</i>	<i>3.468</i>	<i>12.4</i>	<i>11.1</i>	<i>10.1</i>
<i>Guadalajara de Buga</i>	<i>115.6</i>	<i>116.3</i>	<i>115.4</i>	<i>98.55</i>	<i>99.7</i>	<i>99.2</i>	<i>17.1</i>	<i>16.7</i>	<i>16.2</i>
<i>Bugalagrande</i>	<i>21.95</i>	<i>21.49</i>	<i>21.22</i>	<i>10.88</i>	<i>11.68</i>	<i>11.88</i>	<i>11.0</i>	<i>9.80</i>	<i>9.33</i>
<i>Caicedonia</i>	<i>36.53</i>	<i>30.54</i>	<i>29.92</i>	<i>23.99</i>	<i>24.25</i>	<i>24.42</i>	<i>12.5</i>	<i>6.28</i>	<i>5.50</i>
<i>Candelaria</i>	<i>63.463</i>	<i>73.556</i>	<i>80.485</i>	<i>18.588</i>	<i>20.462</i>	<i>22.364</i>	<i>44.87</i>	<i>53.09</i>	<i>58.12</i>
<i>Cartago</i>	<i>120.91</i>	<i>126.95</i>	<i>131.54</i>	<i>117.20</i>	<i>124.46</i>	<i>129.51</i>	<i>3.709</i>	<i>2.485</i>	<i>2.026</i>
<i>El Águila</i>	<i>10.721</i>	<i>10.789</i>	<i>11.026</i>	<i>2.359</i>	<i>2.529</i>	<i>2.664</i>	<i>8.362</i>	<i>8.260</i>	<i>8.362</i>
<i>El Cerrito</i>	<i>52.373</i>	<i>55.466</i>	<i>57.177</i>	<i>31.538</i>	<i>34.013</i>	<i>35.312</i>	<i>20.83</i>	<i>21.45</i>	<i>21.86</i>
<i>Florida</i>	<i>54.370</i>	<i>56.652</i>	<i>57.911</i>	<i>39.453</i>	<i>41.658</i>	<i>42.779</i>	<i>14.91</i>	<i>14.99</i>	<i>15.13</i>
<i>Ginebra</i>	<i>18.700</i>	<i>19.751</i>	<i>20.857</i>	<i>7.018</i>	<i>8.644</i>	<i>9.912</i>	<i>11.68</i>	<i>11.10</i>	<i>10.94</i>
<i>Guacarí</i>	<i>29.874</i>	<i>32.562</i>	<i>34.234</i>	<i>17.326</i>	<i>19.288</i>	<i>20.481</i>	<i>12.54</i>	<i>13.27</i>	<i>13.75</i>
<i>Jamundí</i>	<i>79.133</i>	<i>103.36</i>	<i>117.11</i>	<i>53.305</i>	<i>70.221</i>	<i>79.797</i>	<i>25.82</i>	<i>33.14</i>	<i>37.32</i>
<i>La Unión</i>	<i>28.674</i>	<i>33.477</i>	<i>37.076</i>	<i>21.338</i>	<i>25.862</i>	<i>29.087</i>	<i>7.336</i>	<i>7.615</i>	<i>7.989</i>
<i>La Victoria</i>	<i>14.641</i>	<i>13.864</i>	<i>13.341</i>	<i>9.706</i>	<i>9.505</i>	<i>9.446</i>	<i>4.935</i>	<i>4.359</i>	<i>3.895</i>
<i>Obando</i>	<i>15.043</i>	<i>14.528</i>	<i>14.911</i>	<i>9.082</i>	<i>10.211</i>	<i>10.992</i>	<i>5.961</i>	<i>4.317</i>	<i>3.919</i>
<i>Palmira</i>	<i>268.16</i>	<i>290.45</i>	<i>302.72</i>	<i>216.23</i>	<i>232.92</i>	<i>242.77</i>	<i>51.92</i>	<i>57.53</i>	<i>59.95</i>

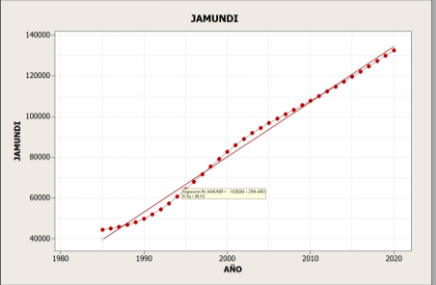
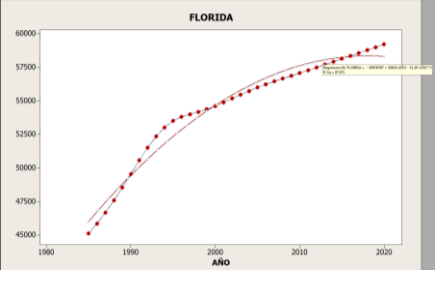
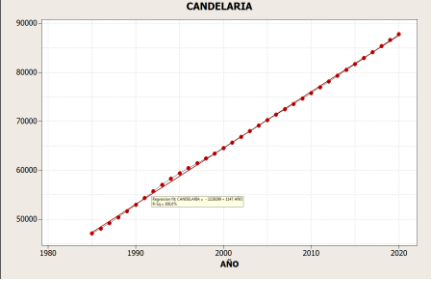
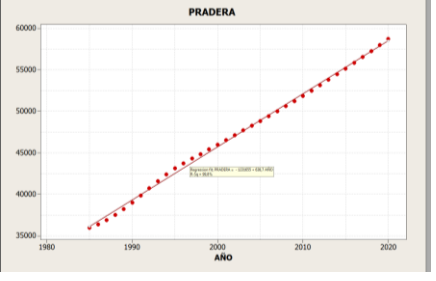
<i>MPIO</i>	<i>TOTAL</i>			<i>CABECERA</i>			<i>RURAL</i>		
	<i>1999</i>	<i>2008</i>	<i>2014</i>	<i>1999</i>	<i>2008</i>	<i>2014</i>	<i>1999</i>	<i>2008</i>	<i>2014</i>
<i>Pradera</i>	<i>45.417</i>	<i>50.626</i>	<i>54.470</i>	<i>38.427</i>	<i>43.929</i>	<i>47.497</i>	<i>6.990</i>	<i>6.697</i>	<i>6.973</i>
<i>Riofrío</i>	<i>19.428</i>	<i>16.464</i>	<i>14.957</i>	<i>6.357</i>	<i>5.232</i>	<i>4.906</i>	<i>13.07</i>	<i>11.23</i>	<i>10.05</i>
<i>Roldanillo</i>	<i>35.962</i>	<i>34.103</i>	<i>32.963</i>	<i>22.527</i>	<i>24.441</i>	<i>24.752</i>	<i>13.435</i>	<i>9.662</i>	<i>8.211</i>
<i>San Pedro</i>	<i>14.739</i>	<i>16.458</i>	<i>17.882</i>	<i>5.473</i>	<i>6.367</i>	<i>7.120</i>	<i>9.266</i>	<i>10.091</i>	<i>10.762</i>
<i>Sevilla</i>	<i>51.480</i>	<i>47.032</i>	<i>45.425</i>	<i>34.995</i>	<i>34.899</i>	<i>34.545</i>	<i>16.485</i>	<i>12.133</i>	<i>10.880</i>
<i>Toro</i>	<i>15.660</i>	<i>16.030</i>	<i>16.333</i>	<i>10.390</i>	<i>9.410</i>	<i>9.312</i>	<i>5.270</i>	<i>6.620</i>	<i>7.021</i>
<i>Trujillo</i>	<i>19.189</i>	<i>18.508</i>	<i>18.158</i>	<i>7.399</i>	<i>7.788</i>	<i>8.156</i>	<i>11.790</i>	<i>10.720</i>	<i>10.002</i>
<i>Tuluá</i>	<i>172.981</i>	<i>194.466</i>	<i>209.086</i>	<i>147.526</i>	<i>167.402</i>	<i>180.458</i>	<i>25.455</i>	<i>27.064</i>	<i>28.628</i>
<i>Ulloa</i>	<i>5.838</i>	<i>5.670</i>	<i>5.490</i>	<i>2.613</i>	<i>2.664</i>	<i>2.679</i>	<i>3.225</i>	<i>3.006</i>	<i>2.811</i>
<i>Vijes</i>	<i>9.015</i>	<i>10.117</i>	<i>10.886</i>	<i>5.139</i>	<i>6.201</i>	<i>6.985</i>	<i>3.876</i>	<i>3.916</i>	<i>3.901</i>
<i>Yotoco</i>	<i>15.282</i>	<i>15.755</i>	<i>16.195</i>	<i>7.172</i>	<i>7.773</i>	<i>8.231</i>	<i>8.110</i>	<i>7.982</i>	<i>7.964</i>
<i>Yumbo</i>	<i>79.304</i>	<i>99.195</i>	<i>114.427</i>	<i>69.597</i>	<i>87.084</i>	<i>100.470</i>	<i>9.707</i>	<i>12.111</i>	<i>13.957</i>
<i>Zarzal</i>	<i>38.179</i>	<i>42.187</i>	<i>44.787</i>	<i>26.766</i>	<i>29.699</i>	<i>31.628</i>	<i>11.413</i>	<i>12.488</i>	<i>13.159</i>

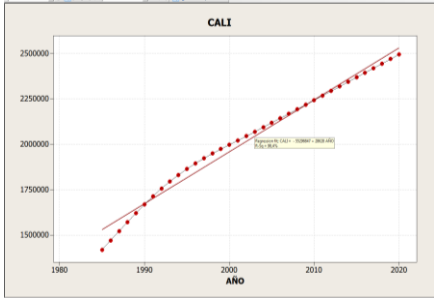
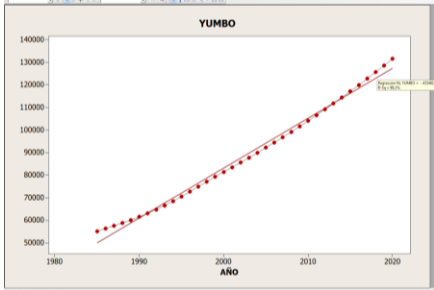
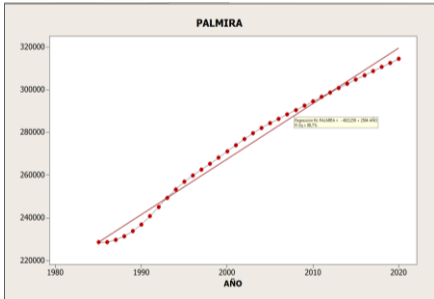
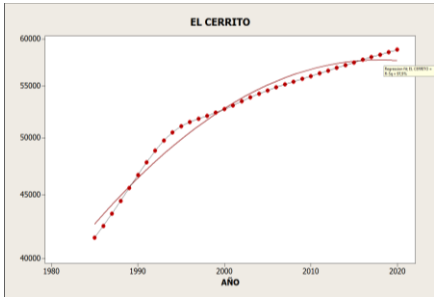
Fuente: Propia, 2015

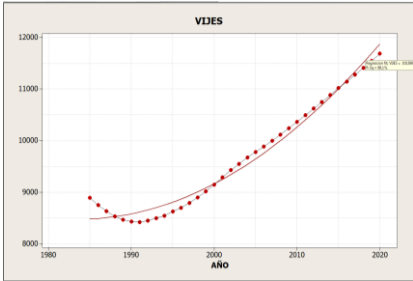
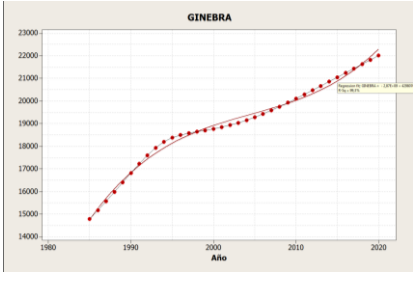
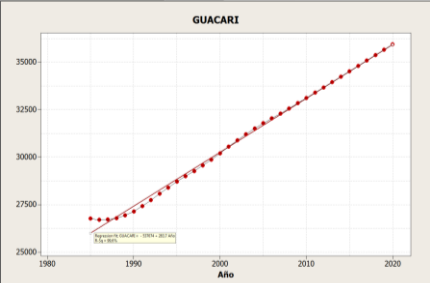
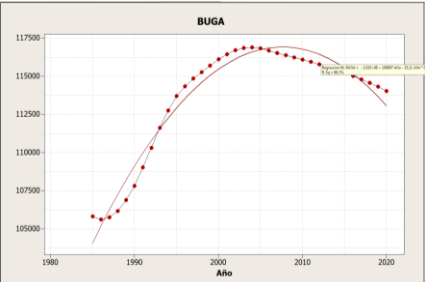
Al hacer el análisis del crecimiento poblacional se determinó en la mayoría de municipios un ajuste al modelo de crecimiento exponencial (Tabla 21), en el caso de municipios como Riofrío, Trujillo, Sevilla de la zona centro y norte del Valle del Cauca se presenta un decrecimiento poblacional lo cual se debe a la problemática del Conflicto armado interno, generado principalmente por grupos paramilitares lo cual generó una reducción considerable por desplazamientos masivos, estos desplazamientos fueron marcados entre 1999 y 2005, de por sí, el departamento en especial la zona centro y sur han

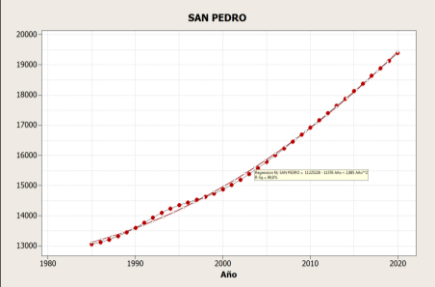
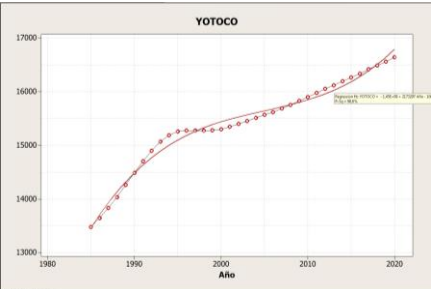
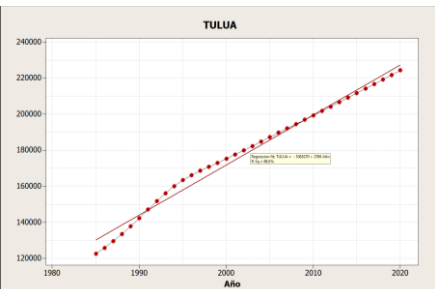
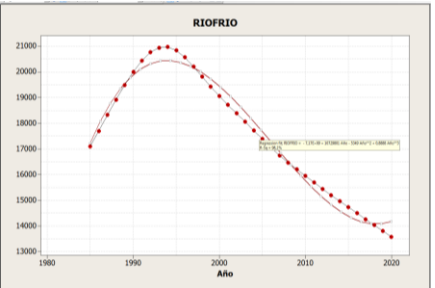
sido constante en sus cifras de desplazamiento generado por grupos armados, la minería ilegal, monocultivos.

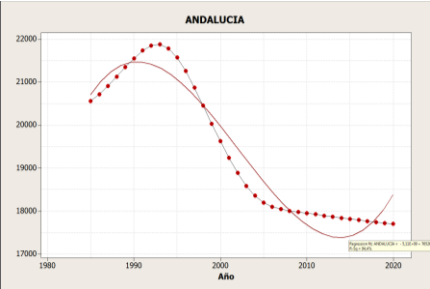
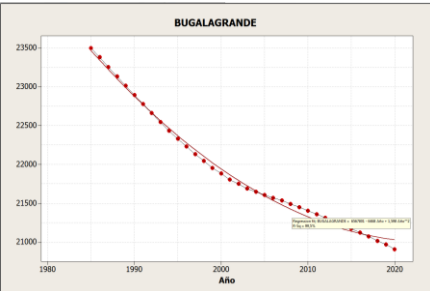
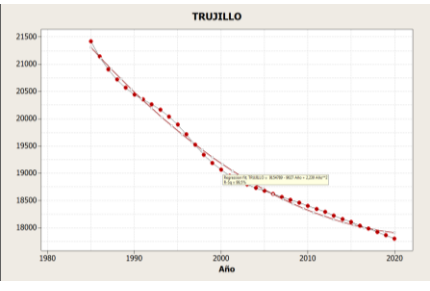
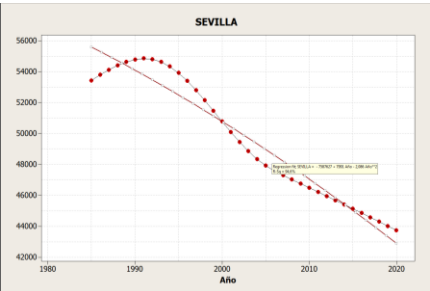
Tabla 21 Ecuaciones, parámetros y gráficos del ajuste del crecimiento poblacional

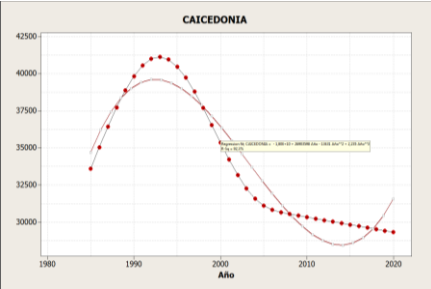
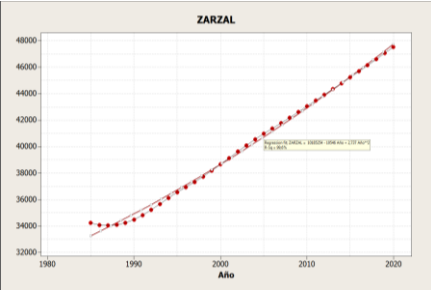
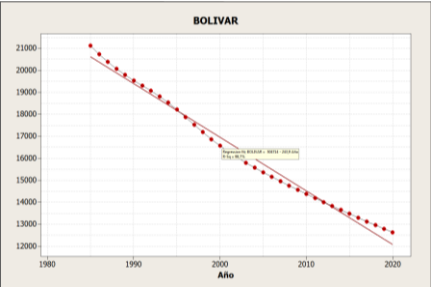
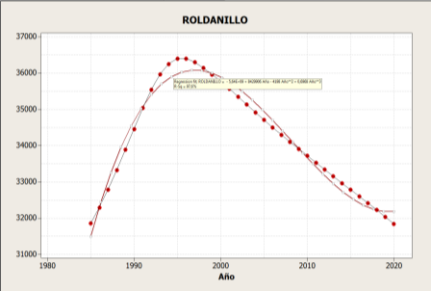
ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	MODELO	GRAFICO	ECUACIÓN
	JAMUNDI	En crecimiento exponencial		$\text{Regresion ft, JAMUNDI} = -5328294 + 2704 \text{ AÑO}$ $R\text{-Sq} = 99.3\%$
	FLORIDA	En crecimiento exponencial		$\text{Regresion ft, FLORIDA} = -45978787 + 45624 \text{ AÑO} - 11.30 \text{ AÑO}^2$ $R\text{-Sq} = 97.6\%$
ZONA SUR	CANDELARIA	En crecimiento exponencial		$\text{Regresion ft, CANDELARIA} = -2229299 + 1147 \text{ AÑO}$ $R\text{-Sq} = 100.0\%$
	PRADERA	En crecimiento exponencial		$\text{Regresion ft, PRADERA} = -1231655 + 638.7 \text{ AÑO}$ $R\text{-Sq} = 99.8\%$


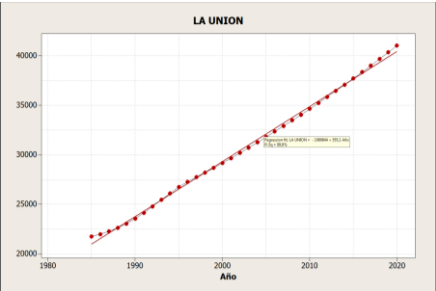
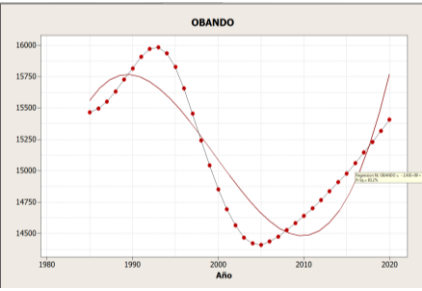
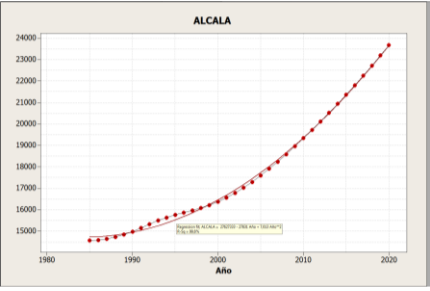
ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	MODELO	GRAFICO	ECUACIÓN
	CALI	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, CALI= - $55296847 + 28628 \text{ AÑO}$</p> <p>R-Sq=98.4%</p>
	YUMBO	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, YUMBO= - $4334618 + 2209 \text{ AÑO}$</p> <p>R-Sq=99.2%</p>
	PALMIRA	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, PALMIRA= - $4921250 + 2594 \text{ AÑO}$</p> <p>R-Sq=98.7%</p>
	EL CERRITO	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, EL CERRITO= - $491.7 + 0.4921 \text{ AÑO} - 0.000122 \text{ AÑO}^2$</p> <p>R-Sq=97.9%</p>

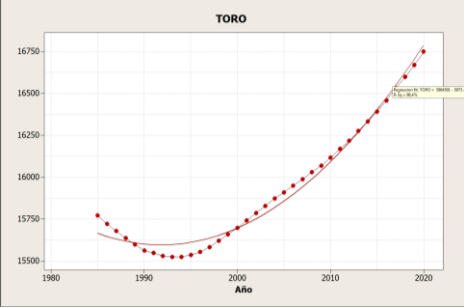
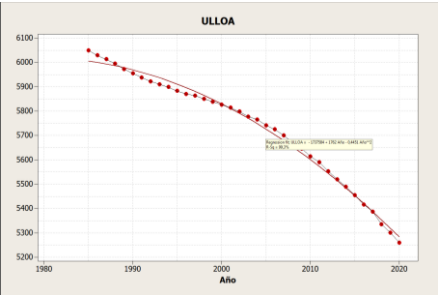
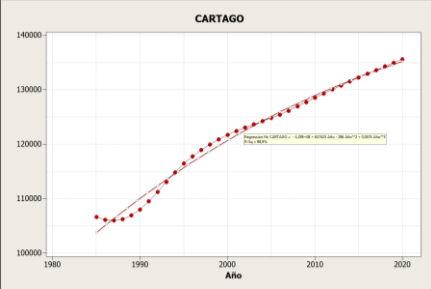
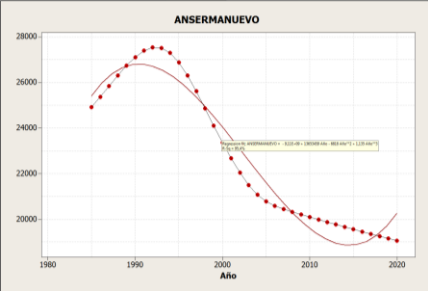
ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	MODELO	GRAFICO	ECUACIÓN
	VIJES	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, VIJES= $10139054 - 10214 \text{ AÑO} + 2.574 \text{ AÑO}^{**2}$</p> <p>R-Sq=98.1%</p>
	GINEBRA	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, GINEBRA= $- 2.87E+09 + 4298076 \text{ AÑO} - 2144 \text{ AÑO}^{**2} + 0.3565 \text{ AÑO}^{**3}$</p> <p>R-Sq=99.3%</p>
ZONA CENTRO	GUACARI	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, GUACARI = $- 537074 + 283.7 \text{ AÑO}$</p> <p>R-Sq=99.6%</p>
	BUGA	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, BUGA = $+ 1.01E+08 - 100807 \text{ AÑO} - 25.11 \text{ AÑO}^{**2}$</p> <p>R-Sq=96.3%</p>

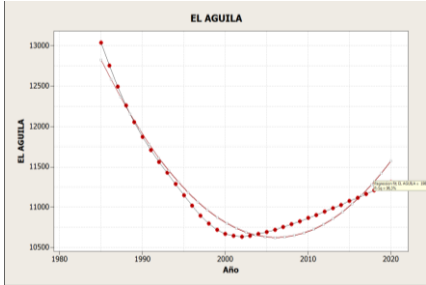
ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	MODELO	GRAFICO	ECUACIÓN
	SAN PEDRO	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, SAN PEDRO = $11225258 - 11376 \text{ AÑO} + 2.885 \text{ AÑO}^{**2}$ $R\text{-Sq}=99.8\%$</p>
	YOTOCO	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, YOTOCO = +1.45 $E+09 + 2173297 \text{ AÑO} - 1084 \text{ AÑO}^{**2} + 0.1802 \text{ AÑO}^{**3}$ $R\text{-Sq}=98.6\%$</p>
	TULUA	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, TULUA = -5365270+ 2769 AÑO $R\text{-Sq}=98.6\%$</p>
	RIOFRIO	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, RIOFRIO = -7.17 $E+09 + 10729801 \text{ AÑO} - 5349 \text{ AÑO}^{**2} + 0.888 \text{ AÑO}^{**3}$ $R\text{-Sq}=98.2\%$</p>

ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	MODELO	GRAFICO	ECUACIÓN
	ANDALUCIA	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, ANDALUCIA = $-5.11 E+09 + 7652632 \text{ AÑO} - 3822 \text{ AÑO}^{**2} + 0.6364 \text{ AÑO}^{**3}$</p> <p>R-Sq=94.4%</p>
	BUGALA GRANDE	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, BUGALAGRANDE = $6567801 - 6468 \text{ AÑO} + 1.598 \text{ AÑO}^{**2}$</p> <p>R- Sq=99.5%</p>
	TRUJILLO	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, TRUJILLO= $9154789 - 9027 \text{ AÑO} + 2.230 \text{ AÑO}^{**2}$</p> <p>R- Sq=99.5%</p>
ZONA NORTE	SEVILLA	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, SEVILLA = $-7587627 + 7991 \text{ AÑO} - 2.086 \text{ AÑO}^{**2}$</p> <p>R- Sq=94.6%</p>

ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	MODELO	GRAFICO	ECUACIÓN
	CAICEDONIA	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, CAICEDONIA = - $1.80E+10 + 26903598 \text{ AÑO} -$ $13431 \text{ AÑO}^{**2} + 2.235 \text{ AÑO}^{**3}$</p> <p>R- Sq=92.3%</p>
	ZARZAL	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, ZARZAL = 1018254 $+ 2.737 \text{ AÑO}^{**2}$</p> <p>R- Sq=99.6%</p>
	BOLIVAR	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, BOLIVAR = 504714 $- 243.9 \text{ AÑO}$</p> <p>R- Sq=98.7%</p>
	ROLDANILLO	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, ROLDANILLO= - $5.64E+09+ 8429906 \text{ AÑO}-4198$ $\text{ANO}^{**2} + 0.6968 \text{ ANO}^{**3}$</p> <p>R- Sq=97.6%</p>

ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	MODELO	GRAFICO	ECUACIÓN
	LA VICTORIA	Descenso poblacional		<p>Regresion ft, LA VICTORIA=</p> $1.07E+08 - 161094 \text{ AÑO} + 81.2 \text{ ANO}^{**2} - 0.01366 \text{ ANO}^{**3}$ <p>R- Sq=98.8%</p>
	LA UNION	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, LA UNION = -</p> $1080844 + 551.1 \text{ AÑO}$ <p>R- Sq=99.8%</p>
	OBANDO	Descenso poblacional		<p>Regresion ft,OBANDO = -</p> $2.43E+09+ 3638694 \text{ AÑO}-1820 \text{ ANO}^{**2} + 0.3034 \text{ ANO}^{**3}$ <p>R- Sq=83.2%</p>
	ALCALA	En crecimiento exponencial		<p>Regresion ft, ALCALA=</p> $27627333 - 27831 \text{ AÑO} + 7.013 \text{ ANO}^{**2}$ <p>R- Sq=99.8%</p>

ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	MODELO	GRAFICO	ECUACIÓN
	TORO	En crecimiento exponencial		$\text{Regresion ft, TORO} = 5964591 - 5973 \text{ AÑO} + 1.499 \text{ ANO}^{**2}$ $R - S_q = 98.4\%$
	ULLOA	Descenso poblacional		$\text{Regresion ft, ULLOA} = -1737584 + 1762 \text{ AÑO} - 0.4451 \text{ ANO}^{**2}$ $R - S_q = 99.3\%$
	CARTAGO	En crecimiento exponencial		$\text{Regresion ft, CARTAGO} = -4.29E+08 + 617423 \text{ AÑO} - 296 \text{ ANO}^{**2} + 0.0474 \text{ ANO}^{**3}$ $R - S_q = 98.9\%$
	ANSERMANUEV	Descenso poblacional		$\text{Regresion ft, ANSERMANUEVO} = -9.11E+09 + 13653459 \text{ AÑO} - 6818 \text{ ANO}^{**2} + 1.135 \text{ ANO}^{**3}$ $R - S_q = 95.4\%$

<i>ZONA DE TRABAJO</i>	<i>MUNICIPIO</i>	<i>MODELO</i>	<i>GRAFICO</i>	<i>ECUACIÓN</i>
	<i>EL AGUILA</i>	<i>En crecimiento exponencial</i>		$\text{Regresion ft, EL AGUILA} = 19820180 + 19749 \text{ AÑO} - 4.922 \text{ AÑO}^2$ $R\text{-Sq} = 96.3\%$

Fuente: Propia, 2015

El crecimiento exponencial evidencia un aumento progresivo de la población, lo cual repercute directamente con el impacto generado sobre los recursos del medio, aumentando el espacio físico y la demanda de recursos.

Tabla 22. Tamaño poblacional para la zona Sur

<i>MPIO /AÑO</i>	<i>JAMUNDI</i>	<i>FLORIDA</i>	<i>CANDELARIA</i>	<i>PRADERA</i>	<i>CALI</i>	<i>YUMBO</i>	<i>PALMIRA</i>	<i>EL CERRITO</i>	<i>VIJES</i>	<i>TOTAL</i>
1985	44.438	45.132	47.156	35.981	1.418.459	55.190	228.699	41.588	8.894	1.925.537
1986	45.037	45.858	48.155	36.401	1.470.644	56.357	228.742	42.482	8.750	1.982.426
1987	45.842	46.683	49.250	36.922	1.522.188	57.560	229.679	43.458	8.633	2.040.215
1988	46.866	47.586	50.428	37.527	1.572.755	58.815	231.373	44.504	8.535	2.098.389
1989	48.181	48.556	51.684	38.231	1.621.948	60.130	233.860	45.582	8.469	2.156.641
1990	49.833	49.541	52.981	38.999	1.669.322	61.535	236.960	46.672	8.431	2.214.274
1991	51.920	50.568	54.353	39.864	1.714.415	63.058	240.881	47.785	8.424	2.271.268
1992	54.424	51.509	55.721	40.737	1.756.781	64.708	245.070	48.817	8.450	2.326.217
1993	57.354	52.361	57.050	41.613	1.796.111	66.512	249.386	49.745	8.496	2.378.628
1994	60.650	53.020	58.282	42.418	1.832.238	68.461	253.373	50.501	8.547	2.427.490
1995	64.224	53.508	59.432	43.143	1.865.307	70.531	256.986	51.081	8.626	2.472.838
1996	67.910	53.801	60.462	43.753	1.895.661	72.701	259.920	51.476	8.699	2.514.383
1997	71.692	54.004	61.446	44.314	1.923.705	74.912	262.668	51.795	8.793	2.553.329
1998	75.456	54.169	62.435	44.856	1.949.903	77.126	265.343	52.076	8.901	2.590.265
1999	79.133	54.370	63.463	45.417	1.974.700	79.304	268.160	52.373	9.015	2.625.935

<i>MPIO /AÑO</i>	<i>JAMUNDI</i>	<i>FLORIDA</i>	<i>CANDELARIA</i>	<i>PRADERA</i>	<i>CALI</i>	<i>YUMBO</i>	<i>PALMIRA</i>	<i>EL CERRITO</i>	<i>VIJES</i>	<i>TOTAL</i>
<i>2000</i>	<i>82.647</i>	<i>54.607</i>	<i>64.557</i>	<i>45.981</i>	<i>1.998.623</i>	<i>81.433</i>	<i>271.112</i>	<i>52.714</i>	<i>9.149</i>	<i>2.660.823</i>
<i>2001</i>	<i>85.940</i>	<i>54.883</i>	<i>65.681</i>	<i>46.555</i>	<i>2.022.178</i>	<i>83.510</i>	<i>274.059</i>	<i>53.088</i>	<i>9.287</i>	<i>2.695.181</i>
<i>2002</i>	<i>89.012</i>	<i>55.172</i>	<i>66.828</i>	<i>47.135</i>	<i>2.045.944</i>	<i>85.613</i>	<i>276.922</i>	<i>53.481</i>	<i>9.428</i>	<i>2.729.535</i>
<i>2003</i>	<i>91.849</i>	<i>55.457</i>	<i>67.999</i>	<i>47.706</i>	<i>2.070.161</i>	<i>87.760</i>	<i>279.602</i>	<i>53.866</i>	<i>9.550</i>	<i>2.763.950</i>
<i>2004</i>	<i>94.447</i>	<i>55.736</i>	<i>69.149</i>	<i>48.276</i>	<i>2.094.843</i>	<i>89.963</i>	<i>282.062</i>	<i>54.234</i>	<i>9.675</i>	<i>2.798.385</i>
<i>2005</i>	<i>96.849</i>	<i>55.996</i>	<i>70.267</i>	<i>48.845</i>	<i>2.119.843</i>	<i>92.214</i>	<i>284.319</i>	<i>54.576</i>	<i>9.781</i>	<i>2.832.690</i>
<i>2006</i>	<i>99.059</i>	<i>56.229</i>	<i>71.381</i>	<i>49.428</i>	<i>2.144.860</i>	<i>94.514</i>	<i>286.382</i>	<i>54.891</i>	<i>9.887</i>	<i>2.866.631</i>
<i>2007</i>	<i>101.216</i>	<i>56.444</i>	<i>72.465</i>	<i>50.017</i>	<i>2.169.838</i>	<i>96.829</i>	<i>288.419</i>	<i>55.178</i>	<i>10.000</i>	<i>2.900.406</i>
<i>2008</i>	<i>103.366</i>	<i>56.652</i>	<i>73.556</i>	<i>50.626</i>	<i>2.194.781</i>	<i>99.195</i>	<i>290.453</i>	<i>55.466</i>	<i>10.117</i>	<i>2.934.212</i>
<i>2009</i>	<i>105.540</i>	<i>56.854</i>	<i>74.669</i>	<i>51.241</i>	<i>2.219.720</i>	<i>101.596</i>	<i>292.508</i>	<i>55.745</i>	<i>10.238</i>	<i>2.968.111</i>
<i>2010</i>	<i>107.767</i>	<i>57.063</i>	<i>75.795</i>	<i>51.867</i>	<i>2.244.668</i>	<i>104.051</i>	<i>294.570</i>	<i>56.032</i>	<i>10.362</i>	<i>3.002.175</i>
<i>2011</i>	<i>110.037</i>	<i>57.272</i>	<i>76.949</i>	<i>52.501</i>	<i>2.269.653</i>	<i>106.559</i>	<i>296.619</i>	<i>56.321</i>	<i>10.493</i>	<i>3.036.404</i>
<i>2012</i>	<i>112.346</i>	<i>57.485</i>	<i>78.111</i>	<i>53.143</i>	<i>2.294.653</i>	<i>109.131</i>	<i>298.671</i>	<i>56.608</i>	<i>10.621</i>	<i>3.070.769</i>
<i>2013</i>	<i>114.707</i>	<i>57.699</i>	<i>79.297</i>	<i>53.804</i>	<i>2.319.684</i>	<i>111.753</i>	<i>300.707</i>	<i>56.892</i>	<i>10.748</i>	<i>3.105.291</i>
<i>2014</i>	<i>117.117</i>	<i>57.911</i>	<i>80.485</i>	<i>54.470</i>	<i>2.344.734</i>	<i>114.427</i>	<i>302.727</i>	<i>57.177</i>	<i>10.886</i>	<i>3.139.934</i>
<i>2015</i>	<i>119.566</i>	<i>58.129</i>	<i>81.700</i>	<i>55.147</i>	<i>2.369.821</i>	<i>117.156</i>	<i>304.735</i>	<i>57.464</i>	<i>11.018</i>	<i>3.174.736</i>

<i>MPIO /AÑO</i>	<i>JAMUNDI</i>	<i>FLORIDA</i>	<i>CANDELARIA</i>	<i>PRADERA</i>	<i>CALI</i>	<i>YUMBO</i>	<i>PALMIRA</i>	<i>EL CERRITO</i>	<i>VIJES</i>	<i>TOTAL</i>
<i>2016</i>	<i>122.071</i>	<i>58.343</i>	<i>82.908</i>	<i>55.842</i>	<i>2.394.925</i>	<i>119.932</i>	<i>306.706</i>	<i>57.747</i>	<i>11.142</i>	<i>3.209.616</i>
<i>2017</i>	<i>124.623</i>	<i>58.555</i>	<i>84.129</i>	<i>56.545</i>	<i>2.420.114</i>	<i>122.762</i>	<i>308.669</i>	<i>58.028</i>	<i>11.276</i>	<i>3.244.701</i>
<i>2018</i>	<i>127.228</i>	<i>58.775</i>	<i>85.352</i>	<i>57.257</i>	<i>2.445.405</i>	<i>125.663</i>	<i>310.594</i>	<i>58.296</i>	<i>11.409</i>	<i>3.279.979</i>
<i>2019</i>	<i>129.877</i>	<i>58.988</i>	<i>86.584</i>	<i>57.990</i>	<i>2.470.852</i>	<i>128.616</i>	<i>312.507</i>	<i>58.563</i>	<i>11.543</i>	<i>3.315.520</i>
<i>2020</i>	<i>132.572</i>	<i>59.215</i>	<i>87.820</i>	<i>58.724</i>	<i>2.496.442</i>	<i>131.645</i>	<i>314.411</i>	<i>58.829</i>	<i>11.685</i>	<i>3.351.343</i>

Fuente: Propia, 2015

Tabla 23. Tamaño poblacional para la zona Centro

<i>MPIO/ AÑO</i>	<i>GINEBRA</i>	<i>GUACARI</i>	<i>BUGA</i>	<i>SAN PEDRO</i>	<i>YOTOCO</i>	<i>TULUA</i>	<i>RIOFRIO</i>	<i>ANDALUCIA</i>	<i>B/GRAND E⁴⁵</i>	<i>TRUJILLO</i>	<i>TOTAL</i>
<i>1985</i>	<i>14.786</i>	<i>26.767</i>	<i>105.82</i>	<i>13.057</i>	<i>13.479</i>	<i>122.581</i>	<i>17.093</i>	<i>20.556</i>	<i>23.497</i>	<i>21.422</i>	<i>379.061</i>
<i>1986</i>	<i>15.168</i>	<i>26.706</i>	<i>105.61</i>	<i>13.124</i>	<i>13.645</i>	<i>125.877</i>	<i>17.697</i>	<i>20.714</i>	<i>23.380</i>	<i>21.140</i>	<i>383.069</i>
<i>1987</i>	<i>15.569</i>	<i>26.717</i>	<i>105.75</i>	<i>13.210</i>	<i>13.833</i>	<i>129.566</i>	<i>18.320</i>	<i>20.905</i>	<i>23.253</i>	<i>20.905</i>	<i>388.033</i>
<i>1988</i>	<i>15.977</i>	<i>26.793</i>	<i>106.17</i>	<i>13.321</i>	<i>14.036</i>	<i>133.562</i>	<i>18.910</i>	<i>21.124</i>	<i>23.131</i>	<i>20.717</i>	<i>393.747</i>
<i>1989</i>	<i>16.405</i>	<i>26.940</i>	<i>106.89</i>	<i>13.451</i>	<i>14.264</i>	<i>137.848</i>	<i>19.484</i>	<i>21.346</i>	<i>23.013</i>	<i>20.567</i>	<i>400.209</i>
<i>1990</i>	<i>16.817</i>	<i>27.139</i>	<i>107.81</i>	<i>13.599</i>	<i>14.487</i>	<i>142.322</i>	<i>19.995</i>	<i>21.545</i>	<i>22.891</i>	<i>20.442</i>	<i>407.053</i>
<i>1991</i>	<i>17.229</i>	<i>27.421</i>	<i>109.03</i>	<i>13.767</i>	<i>14.704</i>	<i>147.055</i>	<i>20.431</i>	<i>21.731</i>	<i>22.777</i>	<i>20.353</i>	<i>414.498</i>
<i>1992</i>	<i>17.604</i>	<i>27.737</i>	<i>110.32</i>	<i>13.935</i>	<i>14.902</i>	<i>151.703</i>	<i>20.760</i>	<i>21.849</i>	<i>22.660</i>	<i>20.261</i>	<i>421.731</i>
<i>1993</i>	<i>17.930</i>	<i>28.074</i>	<i>111.61</i>	<i>14.093</i>	<i>15.070</i>	<i>156.127</i>	<i>20.939</i>	<i>21.875</i>	<i>22.545</i>	<i>20.165</i>	<i>428.435</i>

⁴⁵ Bugalagrande.

<i>MPIO/ AÑO</i>	<i>GINEBRA</i>	<i>GUACARI</i>	<i>BUGA</i>	<i>SAN PEDRO</i>	<i>YOTOCO</i>	<i>TULUA</i>	<i>RIOFRIO</i>	<i>ANDALUCIA</i>	<i>B/GRAND E⁴⁵</i>	<i>TRUJILLO</i>	<i>TOTAL</i>
<i>1994</i>	<i>18.191</i>	<i>28.404</i>	<i>112.75</i>	<i>14.234</i>	<i>15.190</i>	<i>160.041</i>	<i>20.965</i>	<i>21.778</i>	<i>22.431</i>	<i>20.037</i>	<i>434.022</i>
<i>1995</i>	<i>18.380</i>	<i>28.719</i>	<i>113.69</i>	<i>14.349</i>	<i>15.257</i>	<i>163.445</i>	<i>20.833</i>	<i>21.571</i>	<i>22.330</i>	<i>19.892</i>	<i>438.473</i>
<i>1996</i>	<i>18.495</i>	<i>28.996</i>	<i>114.33</i>	<i>14.440</i>	<i>15.275</i>	<i>166.157</i>	<i>20.563</i>	<i>21.257</i>	<i>22.230</i>	<i>19.711</i>	<i>441.459</i>
<i>1997</i>	<i>18.581</i>	<i>29.273</i>	<i>114.84</i>	<i>14.532</i>	<i>15.274</i>	<i>168.562</i>	<i>20.207</i>	<i>20.872</i>	<i>22.133</i>	<i>19.521</i>	<i>443.803</i>
<i>1998</i>	<i>18.643</i>	<i>29.562</i>	<i>115.26</i>	<i>14.627</i>	<i>15.274</i>	<i>170.772</i>	<i>19.813</i>	<i>20.450</i>	<i>22.043</i>	<i>19.339</i>	<i>445.792</i>
<i>1999</i>	<i>18.700</i>	<i>29.874</i>	<i>115.69</i>	<i>14.739</i>	<i>15.282</i>	<i>172.981</i>	<i>19.428</i>	<i>20.026</i>	<i>21.954</i>	<i>19.189</i>	<i>447.866</i>
<i>2000</i>	<i>18.769</i>	<i>30.212</i>	<i>116.10</i>	<i>14.870</i>	<i>15.301</i>	<i>175.245</i>	<i>19.062</i>	<i>19.622</i>	<i>21.882</i>	<i>19.063</i>	<i>450.134</i>
<i>2001</i>	<i>18.845</i>	<i>30.550</i>	<i>116.44</i>	<i>15.022</i>	<i>15.348</i>	<i>177.540</i>	<i>18.709</i>	<i>19.236</i>	<i>21.803</i>	<i>18.949</i>	<i>452.448</i>
<i>2002</i>	<i>18.935</i>	<i>30.891</i>	<i>116.70</i>	<i>15.196</i>	<i>15.400</i>	<i>179.896</i>	<i>18.381</i>	<i>18.883</i>	<i>21.749</i>	<i>18.864</i>	<i>454.900</i>
<i>2003</i>	<i>19.036</i>	<i>31.211</i>	<i>116.86</i>	<i>15.380</i>	<i>15.455</i>	<i>182.314</i>	<i>18.054</i>	<i>18.584</i>	<i>21.687</i>	<i>18.792</i>	<i>457.375</i>
<i>2004</i>	<i>19.146</i>	<i>31.510</i>	<i>116.90</i>	<i>15.578</i>	<i>15.511</i>	<i>184.769</i>	<i>17.714</i>	<i>18.353</i>	<i>21.647</i>	<i>18.727</i>	<i>459.855</i>
<i>2005</i>	<i>19.283</i>	<i>31.785</i>	<i>116.83</i>	<i>15.789</i>	<i>15.573</i>	<i>187.249</i>	<i>17.383</i>	<i>18.196</i>	<i>21.607</i>	<i>18.676</i>	<i>462.372</i>
<i>2006</i>	<i>19.430</i>	<i>32.044</i>	<i>116.67</i>	<i>16.005</i>	<i>15.618</i>	<i>189.694</i>	<i>17.047</i>	<i>18.094</i>	<i>21.569</i>	<i>18.620</i>	<i>464.799</i>
<i>2007</i>	<i>19.582</i>	<i>32.302</i>	<i>116.52</i>	<i>16.226</i>	<i>15.689</i>	<i>192.085</i>	<i>16.742</i>	<i>18.042</i>	<i>21.535</i>	<i>18.560</i>	<i>467.291</i>
<i>2008</i>	<i>19.751</i>	<i>32.562</i>	<i>116.37</i>	<i>16.458</i>	<i>15.755</i>	<i>194.466</i>	<i>16.464</i>	<i>18.000</i>	<i>21.492</i>	<i>18.508</i>	<i>469.833</i>
<i>2009</i>	<i>19.926</i>	<i>32.842</i>	<i>116.24</i>	<i>16.690</i>	<i>15.829</i>	<i>196.852</i>	<i>16.203</i>	<i>17.973</i>	<i>21.449</i>	<i>18.456</i>	<i>472.461</i>

<i>MPIO/ AÑO</i>	<i>GINEBRA</i>	<i>GUACARI</i>	<i>BUGA</i>	<i>SAN PEDRO</i>	<i>YOTOCO</i>	<i>TULUA</i>	<i>RIOFRIO</i>	<i>ANDALUCIA</i>	<i>B/GRAND E⁴⁵</i>	<i>TRUJILLO</i>	<i>TOTAL</i>
<i>2010</i>	<i>20.105</i>	<i>33.115</i>	<i>116.10</i>	<i>16.922</i>	<i>15.901</i>	<i>199.264</i>	<i>15.944</i>	<i>17.946</i>	<i>21.402</i>	<i>18.402</i>	<i>475.102</i>
<i>2011</i>	<i>20.289</i>	<i>33.394</i>	<i>115.94</i>	<i>17.162</i>	<i>15.977</i>	<i>201.688</i>	<i>15.688</i>	<i>17.923</i>	<i>21.360</i>	<i>18.344</i>	<i>477.771</i>
<i>2012</i>	<i>20.479</i>	<i>33.667</i>	<i>115.77</i>	<i>17.397</i>	<i>16.053</i>	<i>204.138</i>	<i>15.439</i>	<i>17.889</i>	<i>21.312</i>	<i>18.289</i>	<i>480.435</i>
<i>2013</i>	<i>20.665</i>	<i>33.955</i>	<i>115.60</i>	<i>17.644</i>	<i>16.119</i>	<i>206.610</i>	<i>15.193</i>	<i>17.865</i>	<i>21.264</i>	<i>18.223</i>	<i>483.147</i>
<i>2014</i>	<i>20.857</i>	<i>34.234</i>	<i>115.43</i>	<i>17.882</i>	<i>16.195</i>	<i>209.086</i>	<i>14.957</i>	<i>17.838</i>	<i>21.220</i>	<i>18.158</i>	<i>485.859</i>
<i>2015</i>	<i>21.047</i>	<i>34.525</i>	<i>115.23</i>	<i>18.133</i>	<i>16.267</i>	<i>211.588</i>	<i>14.725</i>	<i>17.815</i>	<i>21.171</i>	<i>18.103</i>	<i>488.608</i>
<i>2016</i>	<i>21.239</i>	<i>34.799</i>	<i>115.02</i>	<i>18.380</i>	<i>16.338</i>	<i>214.095</i>	<i>14.496</i>	<i>17.787</i>	<i>21.124</i>	<i>18.037</i>	<i>491.321</i>
<i>2017</i>	<i>21.433</i>	<i>35.087</i>	<i>114.79</i>	<i>18.637</i>	<i>16.418</i>	<i>216.619</i>	<i>14.258</i>	<i>17.760</i>	<i>21.075</i>	<i>17.983</i>	<i>494.068</i>
<i>2018</i>	<i>21.624</i>	<i>35.377</i>	<i>114.56</i>	<i>18.882</i>	<i>16.491</i>	<i>219.148</i>	<i>14.029</i>	<i>17.738</i>	<i>21.017</i>	<i>17.919</i>	<i>496.787</i>
<i>2019</i>	<i>21.815</i>	<i>35.662</i>	<i>114.31</i>	<i>19.129</i>	<i>16.560</i>	<i>221.701</i>	<i>13.807</i>	<i>17.713</i>	<i>20.970</i>	<i>17.859</i>	<i>499.532</i>
<i>2020</i>	<i>22.012</i>	<i>35.947</i>	<i>114.04</i>	<i>19.392</i>	<i>16.644</i>	<i>224.280</i>	<i>13.569</i>	<i>17.697</i>	<i>20.906</i>	<i>17.796</i>	<i>502.284</i>

Fuente: Propia, 2015

Tabla 24. Tamaño poblacional para la zona Norte

MPIO/ AÑO	SEVILL A	CAICE D	ZARZAL	BOLIVA R	ROLD A NI	LA VICTORI A	LA UNIO N	OBAND O	ALCAL A	TORO	ULLO A	CARTAG O	ANSE R. NUEV O	EL AGUILA	Total
1985	53.450	33.587	34.243	21.128	31.857	15.634	21.760	15.466	14.559	15.772	6.050	106.688	24.917	13.037	408.148
1986	53.806	35.042	34.078	20.736	32.294	15.402	21.979	15.497	14.579	15.723	6.029	106.118	25.364	12.754	409.401
1987	54.124	36.431	34.038	20.389	32.789	15.223	22.267	15.552	14.638	15.679	6.013	105.990	25.830	12.492	411.455
1988	54.414	37.716	34.083	20.075	33.320	15.077	22.621	15.633	14.722	15.637	5.995	106.272	26.292	12.261	414.118
1989	54.641	38.866	34.235	19.801	33.893	14.983	23.053	15.728	14.840	15.599	5.973	106.972	26.727	12.055	417.366
1990	54.797	39.825	34.471	19.540	34.459	14.913	23.551	15.815	14.973	15.564	5.955	108.017	27.093	11.870	420.843
1991	54.868	40.549	34.818	19.307	35.035	14.886	24.134	15.908	15.150	15.548	5.938	109.522	27.384	11.708	424.755
1992	54.810	41.001	35.221	19.071	35.543	14.878	24.777	15.972	15.321	15.530	5.922	111.232	27.528	11.561	428.367
1993	54.643	41.134	35.664	18.812	35.963	14.889	25.461	15.985	15.490	15.524	5.910	113.087	27.500	11.426	431.488
1994	54.348	40.943	36.116	18.535	36.252	14.885	26.124	15.937	15.630	15.524	5.899	114.854	27.287	11.286	433.620

<i>MPIO/ AÑO</i>	<i>SEVILL A</i>	<i>CAICE D</i>	<i>ZARZAL</i>	<i>BOLIVA R</i>	<i>ROLD A NI</i>	<i>LA VICTORI A</i>	<i>LA UNIO N</i>	<i>OBAND O</i>	<i>ALCAL A</i>	<i>TORO</i>	<i>ULLO A</i>	<i>CARTAG O</i>	<i>ANSE R. NUEV O</i>	<i>EL AGUILA</i>	<i>Total</i>
1995	53.932	40.461	36.546	18.220	36.402	14.870	26.743	15.827	15.763	15.537	5.883	116.490	26.877	11.149	434.700
1996	53.414	39.726	36.928	17.877	36.401	14.825	27.262	15.656	15.863	15.554	5.870	117.799	26.296	11.018	434.489
1997	52.818	38.781	37.326	17.529	36.302	14.767	27.745	15.455	15.963	15.584	5.864	118.969	25.607	10.897	433.607
1998	52.161	37.701	37.737	17.191	36.143	14.704	28.205	15.243	16.074	15.622	5.850	119.983	24.858	10.797	432.269
1999	51.480	36.536	38.179	16.863	35.962	14.641	28.674	15.043	16.204	15.660	5.838	120.918	24.099	10.721	430.818
2000	50.785	35.357	38.658	16.574	35.775	14.565	29.167	14.852	16.370	15.699	5.827	121.741	23.363	10.671	429.404
2001	50.102	34.214	39.135	16.295	35.573	14.479	29.667	14.694	16.554	15.742	5.815	122.438	22.667	10.645	428.020
2002	49.453	33.166	39.626	16.048	35.348	14.396	30.186	14.567	16.777	15.787	5.799	123.081	22.040	10.635	426.909
2003	48.870	32.270	40.095	15.798	35.134	14.310	30.716	14.468	17.023	15.830	5.778	123.670	21.496	10.647	426.105
2004	48.359	31.583	40.542	15.577	34.916	14.224	31.253	14.423	17.290	15.873	5.766	124.252	21.079	10.669	425.806
2005	47.940	31.110	40.968	15.366	34.710	14.132	31.800	14.409	17.588	15.910	5.742	124.842	20.782	10.693	425.992
2006	47.595	30.832	41.370	15.159	34.499	14.038	32.353	14.437	17.907	15.950	5.725	125.459	20.588	10.721	426.633
2007	47.305	30.665	41.773	14.957	34.300	13.950	32.906	14.476	18.232	15.989	5.700	126.182	20.444	10.757	427.636
2008	47.032	30.546	42.187	14.757	34.103	13.864	33.477	14.528	18.586	16.030	5.670	126.951	20.322	10.789	428.842
2009	46.768	30.441	42.614	14.570	33.911	13.774	34.046	14.583	18.953	16.069	5.646	127.755	20.212	10.826	430.168

<i>MPIO/ AÑO</i>	<i>SEVILLA</i>	<i>CAICED</i>	<i>ZARZAL</i>	<i>BOLIVAR</i>	<i>ROLDANI</i>	<i>LA VICTORIA</i>	<i>LA UNION</i>	<i>OBANDO</i>	<i>ALCALA</i>	<i>TORO</i>	<i>ULLOA</i>	<i>CARTAGO</i>	<i>ANSE R. NUEVO</i>	<i>EL AGUILA</i>	<i>Total</i>
2010	46.504	30.341	43.041	14.378	33.718	13.694	34.633	14.642	19.337	16.117	5.614	128.544	20.101	10.866	431.530
2011	46.237	30.238	43.471	14.189	33.529	13.603	35.229	14.702	19.713	16.169	5.590	129.319	19.989	10.903	432.881
2012	45.965	30.132	43.908	14.001	33.343	13.518	35.836	14.768	20.110	16.218	5.553	130.076	19.876	10.945	434.249
2013	45.696	30.032	44.342	13.827	33.153	13.426	36.452	14.837	20.512	16.277	5.520	130.820	19.771	10.987	435.652
2014	45.425	29.928	44.787	13.652	32.963	13.341	37.076	14.911	20.930	16.333	5.490	131.545	19.666	11.026	437.073
2015	45.143	29.830	45.234	13.480	32.781	13.253	37.711	14.978	21.364	16.392	5.455	132.249	19.563	11.079	438.512
2016	44.875	29.732	45.683	13.303	32.601	13.167	38.360	15.062	21.799	16.458	5.416	132.959	19.451	11.116	439.982
2017	44.590	29.629	46.140	13.131	32.412	13.076	39.011	15.146	22.245	16.533	5.387	133.640	19.355	11.164	441.459
2018	44.311	29.526	46.599	12.961	32.226	12.994	39.671	15.229	22.710	16.598	5.336	134.308	19.252	11.209	442.930
2019	44.028	29.424	47.062	12.795	32.035	12.902	40.339	15.318	23.195	16.669	5.301	134.972	19.160	11.261	444.461
2020	43.746	29.333	47.534	12.636	31.842	12.813	41.020	15.409	23.677	16.749	5.260	135.629	19.056	11.310	446.014

Fuente: Propia, 2015

Según los resultados obtenidos de las densidades demográficas para cada sector de la Cuenca los sectores bajo, medio y alto se diferencian claramente por las distintas densidades demográficas. Las densidades demográficas más altas corresponden a los partidos de la cuenca sur.

20.1 Cálculo del Indicador Demográfico (ID).

El objetivo del indicador demográfico es establecer la incidencia de la población, cuando el ID=1 se asume que la incidencia antrópica es máxima y cuando se aproxima a 0 se considera un bajo impacto de la población sobre el territorio.

La fórmula establecida para calcular el indicador demográfico es la siguiente:

$$ID = N / Kp$$

N = tamaño poblacional (cantidad de habitantes)

Kp = Capacidad de Carga poblacional en el sector estudiado (zona de la cuenca o cuenta entera).

Para calcular el Indicador demográfico por sector de la cuenca se establece la siguiente ecuación:

$$ID_{\text{CUENCA NORTE}} = N_{\text{CUENCA NORTE}} / Kp_{\text{CUENCA NORTE}}$$

Teniendo en cuenta la resolución espacial de las imágenes utilizadas en el presente estudio, donde la unidad mínima del pixel equivale a 900 m², las poblaciones pequeñas por

la escala de la imagen no se tienen en cuenta asumiendo que no afectan la cuenca con un indicador demográfico equivalente a 0.

En el cálculo de la capacidad de carga máxima se identifica que ninguna población puede llegar a tener un KPmax, es decir aún están en crecimiento, en el caso de los valores de capacidad de carga negativos se evidencian cuando hay una reducción en la población, por lo cual se descartan dichos valores.

Los KP calculados se presentan en la tabla 25.

Tabla 25. Caculo de Kp

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA TOTAL MPIO (HAS)	AÑO QUE ALCANZÓ LA KP	POBLACIÓN MAX ESTIMADA	KDP DENSIDAD POBLACION AL MÁXIMA (HAB/HA)	ID SEGÚN LA KP ESTIMADA
1	ZONA SUR	JAMUNDI	60.757,31	En crecimiento exponencial	298.735	4,9168524	0,39204345
		FLORIDA	40.473,11	En crecimiento exponencial	917.841	22,6779102	0,06309482
		CANDELARIA	29.334,89	En crecimiento exponencial	338.722	11,5467254	0,23761377
		PRADERA	35.676,39	En crecimiento exponencial	299.675	8,399812398	0,18176361
		CALI	57.596,43	En crecimiento exponencial	13.651.582	237,0213334	0,17175547
		YUMBO	23.272,75	En crecimiento exponencial	312.089	13,41006727	0,3666485

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA TOTAL MPIO (HAS)	AÑO QUE ALCANZÓ LA KP	POBLACIÓN MAX ESTIMADA	KDP DENSIDAD POBLACION AL MÁXIMA (HAB/HA)	ID SEGÚN LA KP ESTIMADA
		PALMIRA	100.472,8	En crecimiento exponencial	2.496.767	24,85015716	0,12124759
		EL CERRITO	44.206,77	En crecimiento exponencial	651.512	14,73782415	0,08776053
		VIJES	11.216,60	En crecimiento exponencial	57.724	5,146281591	0,1885877
		GINEBRA	26.795,01	En crecimiento exponencial	191.057	7,130338049	0,1091661
		GUACARI	16.344,73	En crecimiento exponencial	251.294	15,37463241	0,13623077
		BUGA	82.458,78	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,00225852
		SAN PEDRO	20.500,51	En crecimiento exponencial	92.510	4,512581117	0,19329758
2	ZONA CENTRO	YOTOCO	31.587,19	En crecimiento exponencial	279.095	8,83569512	0,05802689
		TULUA	90.559,06	En crecimiento exponencial	1.102.984	12,17972359	0,18956389
		RIOFRIO	29.922,66	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,26153591
		ANDALUCIA	10.585,90	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,11570042
		BUGALAGRAN D	40.883,04	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,03400522
		TRUJILLO	33.706,97	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,05522596

No.	ZONA DE TRABAJO	MUNICIPIO	AREA TOTAL MPIO (HAS)	AÑO QUE ALCANZÓ LA KP	POBLACIÓN MAX ESTIMADA	KDP DENSIDAD POBLACION AL MÁXIMA (HAB/HA)	ID SEGÚN LA KP ESTIMADA
3	ZONA NORTE	SEVILLA	55.638,07	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,12513077
		CAICEDONIA	16.712,25	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,19950358
		ZARZAL	35.049,63	En crecimiento exponencial	280.564	8,004750844	0,15963229
		BOLIVAR	57.596,43	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,21123584
		ROLDANILLO	23.531,82	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,08707711
		LA VICTORIA	25.677,94	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,09298381
		LA UNION	11.241,65	En crecimiento exponencial	144.276	12,83408837	0,25697907
		OBANDO	21.315,67	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,00881357
		ALCALA	6.228,83	En crecimiento exponencial	81.782	13,12952453	0,25592541
		TORO	17.685,84	En crecimiento exponencial	388.161	21,94755362	0,04207791
		ULLOA	4.255,78	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,06146002
		CARTAGO	24.931,86	En crecimiento exponencial	1.561.618	62,63542194	0,08423637
		ANSERMANU.	29.219,62	Descenso poblacional	No estimable	No estimable	-0,20327909
EL AGUILA	18.378,77	En crecimiento	393.060	21,38664228	0,02805169		

<i>No.</i>	<i>ZONA DE TRABAJO</i>	<i>MUNICIPIO</i>	<i>AREA TOTAL MPIO (HAS)</i>	<i>AÑO QUE ALCANZÓ LA KP</i>	<i>POBLACIÓN MAX ESTIMADA</i>	<i>KDP DENSIDAD POBLACION AL MÁXIMA (HAB/HA)</i>	<i>ID SEGÚN LA KP ESTIMADA</i>
<i>exponencial</i>							

Fuente: Propia, 2015

El indicador demográfico es un componente de gran importancia considerado para establecer el índice de incidencia antrópica (IIA) teniendo en cuenta que el tamaño poblacional y el área urbana repercuten en el comportamiento de la cuenca.

A continuación, se presenta el cálculo del indicador demográfico para los municipios del sector NORTE, CENTRO y SUR de la cuenca para los años objeto de estudio (tabla 26 a la tabla 28).

Tabla 26. Cálculo del indicador demográfico para el sector Norte del área de estudio.

MPIO	SEVILLA	CAICEDO	ZARZAL	BOLIVAR	ROLDANIL L	LA VICTORIA	LA UNION	OBANDO	ALCALA	TORO	ULLOA	CARTAG O	ANSERM A NUEVO	EL AGUILA
AREA TOTAL MPIO (HAS)	55.638,0	16712,25	35049,627	57.596,43	23531,81	25677,94	11.241,65	21315,66	5228,834	17.685, 8	4255,78	24.931,8	29.219,6	18.378,77
1999	-0,0135	0,03280	0,01246	0,01728	-0,0052	-0,005204	0,0170	-0,012	0,01019	0,002	- 0,001885	0,0067	-0,0310	-0,00467
2008	-0,0056	-0,0034	0,0100	-0,0127	-0,0056	-0,00651	0,0168	0,0037	0,019	0,002	-0,004	0,0063	-0,0054	0,0034
2014	-0,0062	-0,0032	0,0099	-0,01267	-0,00553	-0,00661	0,0169	0,0044	0,0205	0,0036	- 0,006395	0,005	-0,0052	0,0047953

Fuente: Propia, 2015

Tabla 27. Cálculo del indicador demográfico para el sector Centro del área de estudio.

MUNICIPIO	GINEBRA	GUACARI	BUGA	SAN PEDRO	YOTOCO	TULUA	RIOFRIO	ANDALUCIA	BUGALAGRANDE	TRUJILLO
AREA TOTAL MPIO (HAS)	26795,0103	16344,7284	82.458,78	20500,5095	31587,1873	90559,0614	29.922,66	10585,8962	40883,0421	33706,9721
1999	0,00368305	0,01125066	0,00358066	0,00884872	0,00124252	0,01300323	-0,0190185	0,02038004	-0,00328497	-0,00658791
2008	0,00882129	0,00856222	-0,0011693	0,01399806	0,00468593	0,01219484	-0,01597977	-0,00150113	-0,00200275	-0,00281355
2014	0,00906841	0,0084644	-0,00171677	0,01393886	0,00443596	0,01189534	-0,01563269	-0,00129021	-0,00231181	-0,00303356

Fuente: Propia, 2015

Tabla 28. Cálculo del indicador demográfico para el sector Sur del área de estudio.

<i>MUNICIPIO</i>	<i>JAMUNDI</i>	<i>FLORIDA</i>	<i>CANDELARIA</i>	<i>PRADERA</i>	<i>CALI</i>	<i>YUMBO</i>	<i>PALMIRA</i>	<i>EL CERRITO</i>	<i>VIJES</i>
<i>AREA TOTAL MPIO (HAS)</i>	<i>60.757,31</i>	<i>40.473,11</i>	<i>29334,8925</i>	<i>35.676,39</i>	<i>57.596,43</i>	<i>23272,7469</i>	<i>100.472,89</i>	<i>44206,7681</i>	<i>11216,6046</i>
<i>1999</i>	<i>0,04344854</i>	<i>0,00434955</i>	<i>0,0170915</i>	<i>0,01234178</i>	<i>0,01204196</i>	<i>0,02649203</i>	<i>0,0109482</i>	<i>0,00648988</i>	<i>0,01475473</i>
<i>2008</i>	<i>0,02081394</i>	<i>0,00355929</i>	<i>0,01501799</i>	<i>0,01207471</i>	<i>0,01129879</i>	<i>0,02391655</i>	<i>0,00705024</i>	<i>0,0050175</i>	<i>0,01188911</i>
<i>2014</i>	<i>0,02069509</i>	<i>0,00375733</i>	<i>0,01498317</i>	<i>0,01235226</i>	<i>0,01064246</i>	<i>0,02356931</i>	<i>0,00661114</i>	<i>0,00500695</i>	<i>0,01205274</i>

Fuente: Propia, 2015

A continuación, se presenta la relación del indicador demográfico para toda la cuenca en el Valle del Cauca:

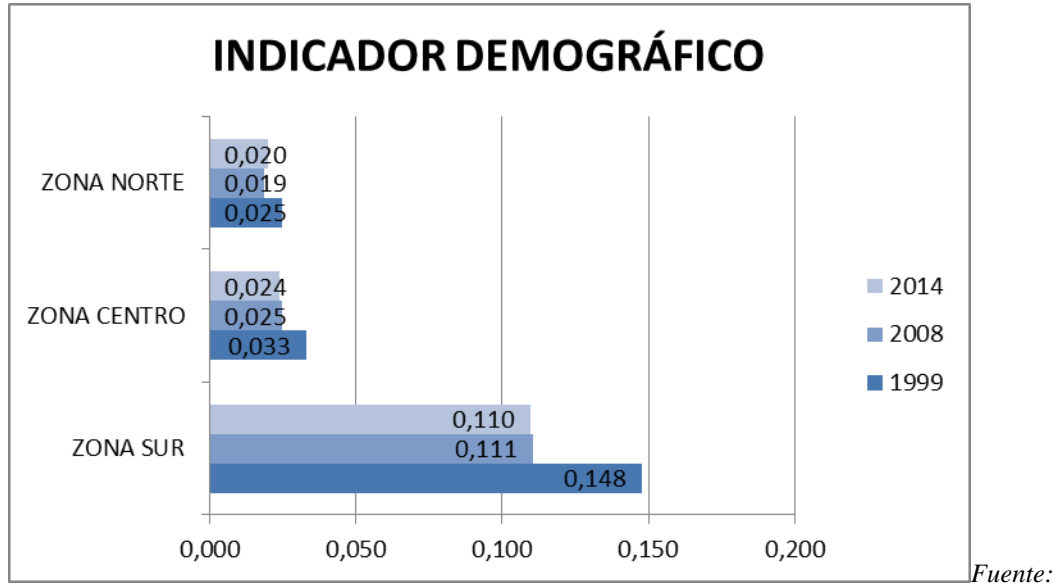


Figura 44. Indicador Demográfico

Propia, 2015

En la figura 44 se evidencian los valores obtenidos en el cálculo del índice demográfico, se observan valores más altos en la zona sur del área de estudio, esto debido a que las principales ciudades del departamento como Cali, Yumbo, Palmira y Jamundí se encuentran en este sector siendo a su vez las de mayor densidad poblacional, el crecimiento y el tamaño de la población en las zonas norte y centro son mucho menores caracterizándose el departamento por encontrarse la menor población en el noroccidente (Torres, 2013, p 52).

La vegetación juega un papel fundamental en la regulación ecosistémica de las cuencas hidrográficas, desde el inicio de los primeros trabajos se ha planteado la importancia y el significado del bosque en el estudio y manejo de la cuenca hidrográfica, tratando de explicar en ella, la relación existente entre el bosque y el suelo, el bosque y el agua o el régimen de caudales, en una perspectiva más compleja la relación agua-suelo-bosque.⁴⁶

El mayor grado de conflicto por uso del suelo en el Valle del Cauca se registra por la ocupación en cultivos básicamente causado por la utilización de las márgenes de ríos para el establecimiento de cultivos de caña de azúcar, olvidando que su verdadera vocación es para coberturas forestales que permitan la protección de sus franjas y ganadería las zonas forestales ubicadas en las partes altas de las cuencas.

Para establecer las áreas de vegetación natural y artificial se procedió con ayuda de imágenes, cartografía existente y salidas de campo la ubicación de las regiones de interés ROI, en el caso de la vegetación natural se ubicó en la zona media y alta de la cordillera central y occidental donde se encuentra bosque nativo y la vegetación artificial fueron tomados en el valle del río, especialmente donde hay pasturas, cultivos misceláneos,

⁴⁶ Universidad Nacional fragmento 2. Curso Manejo de Cuencas Hidrográficas. Bogotá

cultivos herbáceos y con base en la clasificación supervisada general se 220
cuantificaron las coberturas para determinar el indicador de vegetación.

21.1 Calculo del Indicador de Vegetación

El Indicador de Vegetación (IV) está diseñado de tal manera que represente la proporción de zonas verdes en la cuenca teniendo en cuenta la proporción de vegetación natural y artificial, ambos como medida de la incidencia antrópica sobre el ecosistema fluvial original.

Se considera que cuando $IV=1$ cuando el área está completamente cubierta por vegetación natural (autóctona). El indicador de vegetación disminuye a medida que disminuya la cobertura vegetal con respecto a otras coberturas y/o a medida que disminuya el área natural con respecto a la cobertura artificial. Cuando el indicador de vegetación equivale a 0 se asume que la vegetación es nula.

El indicador se calcula:

$$IV = ((a*N) + A)/a$$

Dónde: a es una constante, N es la proporción del área con vegetación natural, y A la del área con vegetación artificial.

El indicador de vegetación no solo refleja el área cubierta por vegetación natural sino además el cambio de vegetación nativa a vegetación artificial estas variaciones juegan un papel de gran importancia para el desarrollo ecosistémico de la cuenca desde su capacidad de captación y regulación hídrica.

A continuación, se presenta la tabla con los valores del indicador de vegetación para los tres sectores de la cuenca 221

Tabla 29. Indicador de vegetación para la zona norte de la cuenca objeto de estudio.

<i>AÑO</i>	<i>Vegetación Natural o autóctona</i>	<i>Vegetación Artificial y zonas de intervención del hombre</i>	<i>% Vegetación Natural</i>	<i>% Vegetación Artificial</i>	<i>Indicador de Vegetación</i>
<i>1999</i>	<i>2281,32</i>	<i>213166,44</i>	<i>0,01</i>	<i>0,71</i>	<i>0,37</i>
<i>2008</i>	<i>17222,67</i>	<i>159691,77</i>	<i>0,06</i>	<i>0,54</i>	<i>0,33</i>
<i>2014</i>	<i>43118,149</i>	<i>74743,83</i>	<i>0,14</i>	<i>0,25</i>	<i>0,27</i>

Fuente: Propia, 2015

Tabla 30 Indicador de vegetación para la zona centro de la cuenca objeto de estudio.

<i>ANO</i>	<i>Vegetación Natural o autóctona</i>	<i>Vegetación Artificial y zonas de intervención del hombre</i>	<i>% Vegetación Natural</i>	<i>% Vegetación Artificial</i>	<i>Indicador de Vegetación</i>
<i>1999</i>	<i>9831,6</i>	<i>258664,41</i>	<i>0,03</i>	<i>0,69</i>	<i>0,37</i>
<i>2008</i>	<i>67881,78</i>	<i>155431,53</i>	<i>0,18</i>	<i>0,42</i>	<i>0,39</i>
<i>2014</i>	<i>186552,72</i>	<i>237258,27</i>	<i>0,50</i>	<i>0,63</i>	<i>0,82</i>

Fuente: Propia, 2015

de estudio.

AÑO	Vegetación Natural o autóctona	Vegetación Artificial y zonas de intervención del hombre	% Vegetación Natural	% Vegetación Artificial	Indicador de Vegetación
1999	6.964,47	311365,62	0,02	0,79	0,41
2008	111.587,67	153778,77	0,28	0,39	0,48
2014	70.288,11	112517,82	0,18	0,28	0,32

Fuente: Propia, 2015

De acuerdo a los valores obtenidos en el indicador de vegetación para cada uno de los sectores se evidencia una reducción en la cobertura natural en la zona norte y sur, esta disminución se debe en gran medida al impulso de la minería ilegal y la implementación de cultivos ilícitos en algunos sectores de la cuenca.

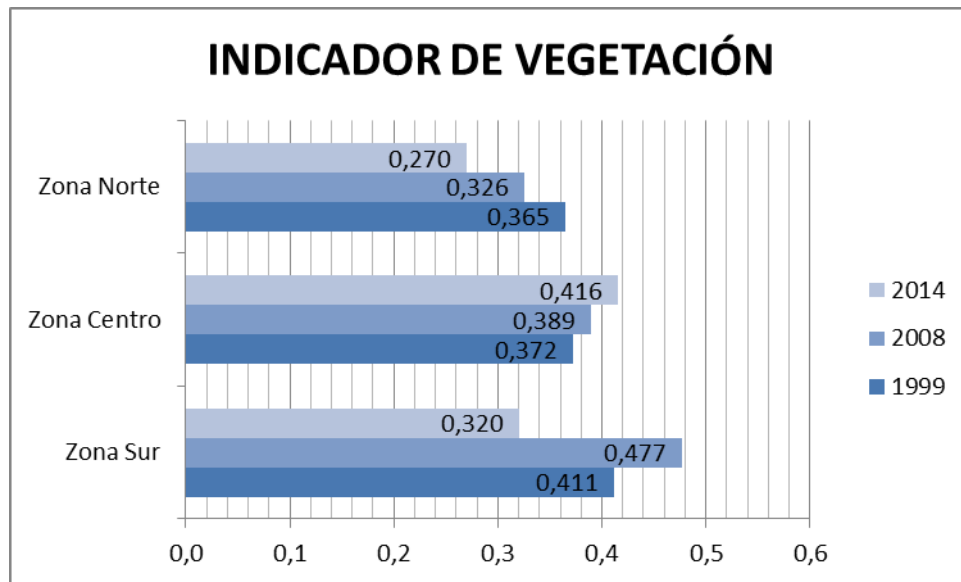


Figura 45. Indicador de Vegetación

Fuente: Elaboración propia.

del indicador de vegetación en los 3 sectores es muy similar obteniendo valores menores a 0,5, esto se explica dado que la producción agropecuaria del departamento se concentra principalmente en los márgenes del río Cauca, en el sector norte y parte del centro la economía agropecuaria se centra en el cultivo del café consolidándose como la zona más agrícola del departamento.

En el año 2009, Madero y Nuñez realizaron un estudio donde identificaron los cambios de cobertura de área y uso del suelo en las zonas de los humedales La Bolsa, Charco de Oro y El Pital, localizados en la parte plana del municipio de Andalucía corregimiento de Campoalegre y El Salto en el Valle del Cauca con información cartográfica y satelital de los años 1950, 1998 y 2002 donde lograron identificar los cambios que ha sufrido la cobertura del suelo en la zona, a partir de este estudio identificaron una alta variación en el paisaje pasando de un hábitat en un alto estado natural de conservación a un hábitat en condiciones precarias y fragmentadas por la implementación de agricultura de altos insumos y pasturas lo cual se ve claramente reflejado en el resultado del Indicador de Vegetación donde si bien es cierto los bajos valores identifican un bajo impacto en el cambio de la cobertura natural a la artificial, si es evidente el deterioro progresivo del paisaje a partir del establecimiento de coberturas como cultivos de caña de azúcar, café y pasturas a lo largo de la cuenca.

El ordenamiento de los asentamientos urbanos ha estado regido por el emplazamiento de estos en márgenes de cursos de agua; con el paso del tiempo la relación de las urbanizaciones con los ríos ha generado conflictos de diferente índole, como consecuencia, la poca planificación y ordenamiento del territorio ha generado una difícil relación entre la expansión urbana y la conservación del recurso hídrico, donde se evidencia que ahora los ríos hacen parte de las ciudades y no son estas últimas las que se desarrollan respetando la dinámica natural de las cuencas, estas fallas se evidencian en el poco ordenamiento urbano y los permanentes problemas socioculturales y económicos de la población.

Para calcular el indicador de modificación de diseño de cauce se parte de las imágenes clasificadas, se procede a vectorizar la cobertura del río y se cuantifico la longitud de cauces; como línea base de análisis de la modificación del diseño se tomó como referencia la información suministrada por la CVC del año 1977. El cálculo del indicador permite identificar qué tanto a cambio el cauce con relación al año de referencia, siendo este 1977.

En el año 2014, conforme a lo identificado a través de la imagen Landsat el cauce principal del río Cauca en el Departamento del Valle tiene una longitud de unos 420.58 km.

Se encontró poca información relacionada con obras realizadas en el río. Por lo tanto, se tomó como línea base información suministrada por la CVC en formato .shp del río Cauca para el año 1977 obteniendo la siguiente información:

Tabla 32. Longitud Río Cauca año 1977

ZONA SUR (Km)	ZONA CENTRO (Km)	ZONA NORTE (Km)	TOTAL (Km)
199,1047901	136,4759537	122,6988544	458,2795982

Fuente: Propia, 2105

Tras la clasificación supervisada de las imágenes Landsat y de Radarsat 2, se calculó la longitud del cauce para los años en estudio obteniendo la siguiente información:

Tabla 33. Longitud del Río Cauca - Periodo de estudio

IMAGEN	LONGITUD DEL RIO - ZONA DE ESTUDIO (KM)			TOTAL LONG (Km)
	ZONA SUR	ZONA CENTRO	ZONA NORTE	
LANDSAT 1999	171,93	133,06	112,85	417,84
LANDSAT 2008	173,05	133,14	112,52	418,71
RADARSAT 2 - 2011	172,94	132,94	112,41	418,29
LANDSAT 2014	173,8	133,31	113,47	420,58

Fuente: Propia, 2015

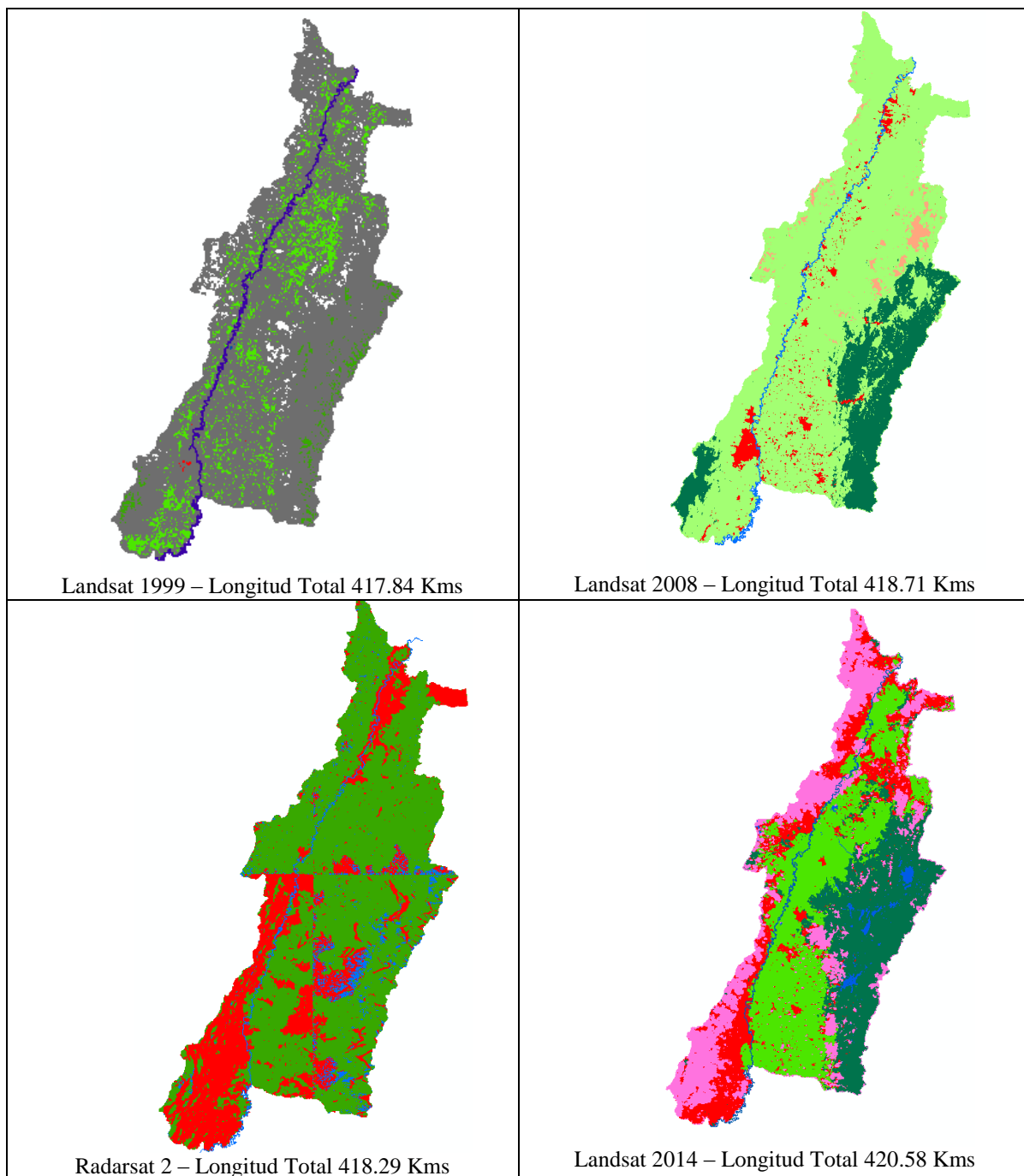


Figura 46. – Determinación de la longitud del cauce del Rio Cauca

Fuente: Propia, 2015

diferentes grados de erosión que dependen de la composición litológica y de la posición de la orilla con respecto a la forma meándrica del río. Más del 60% de las curvas están siendo afectadas por algún grado de erosión que es mucho mayor que la erosión que afecta los taludes ubicados en tramos rectos y curvas internas, alcanzando tramos hasta de 400 m de longitud.

La erosión es crítica en el tramo entre Tablanca y Juanchito. El proceso puede ser una manifestación de la intensa explotación de materiales de arrastre a que está siendo sometido el cauce en este sector, produciendo, además, la casi total ausencia de playas aluviales que normalmente se forman sobre la parte interna de las curvas del río.⁴⁷

22.1 Calculo del Indicador de Diseño de Cauce

El índice de diseño de cauce se calcula a partir de:

$$\text{IMDC} = 1 - (\text{long- rio } x / \text{long} - \text{MAX})$$

IMDC: de 0 a 1.

⁴⁷ Ramírez Callejas, Carlos. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL RIO CAUCA. CAPITULO 3 CARACTERIZACION DEL RIO CAUCA Y SUS TRIBUTARIOS. 2011

El rango del IMDC va de 0 a 1, el valor será 1 cuando la longitud del cauce sea la máxima, mientras que el IMDC valdrá 0 en el caso hipotético que la longitud sea cero. Si se sobrepasaría ese valor significaría que se ha alargado el cauce más allá del valor original.

Una vez aplicado el indicador se presentan los siguientes resultados:

Tabla 34. Indicador de diseño de cauce para la zona norte de la cuenca objeto de estudio.

<i>IMAGEN</i>	<i>LONG. RIO (Km)</i>	<i>INDICADOR DE MODIFICACION CAUCE</i>
<i>LANDSAT 1999</i>	<i>112,85</i>	<i>0,009566438</i>
<i>LANDSAT 2008</i>	<i>112,52</i>	<i>0,0124627</i>
<i>RADARSAT 2 - 2011</i>	<i>112,41</i>	<i>0,01342812</i>
<i>LANDSAT 2014</i>	<i>113,47</i>	<i>0,004124978</i>

Fuente: Propia, 2015

Tabla 35 Indicador de diseño de cauce para la zona centro de la cuenca objeto de estudio.

<i>IMAGEN</i>	<i>LONG. RIO (Km)</i>	<i>INDICADOR DE MODIFICACION CAUCE</i>
<i>LANDSAT 1999</i>	<i>133,06</i>	<i>0,005010095</i>
<i>LANDSAT 2008</i>	<i>133,14</i>	<i>0,004411875</i>
<i>RADARSAT 2 - 2011</i>	<i>132,94</i>	<i>0,005907425</i>
<i>LANDSAT 2014</i>	<i>133,31</i>	<i>0,003140657</i>

Fuente: Propia, 2015

Tabla 36. Indicador de diseño de cauce para la zona sur de la cuenca objeto de estudio.

<i>IMAGEN</i>	<i>LONG. RIO (Km)</i>	<i>INDICADOR DE MODIFICACION CAUCE</i>
<i>LANDSAT 1999</i>	<i>171,93</i>	<i>0,008387097</i>
<i>LANDSAT 2008</i>	<i>173,05</i>	<i>0,014956012</i>
<i>RADARSAT 2 - 2011</i>	<i>172,94</i>	<i>0,01431085</i>
<i>LANDSAT 2014</i>	<i>173,8</i>	<i>0,019354839</i>

Fuente: Propia, 2015

Teniendo en cuenta que entre más se aproxime a 0 el valor del indicador establece una menor variación en el diseño de cauce, es posible evidenciar que no ha habido cambios trascendentales en el cauce del río Cauca a lo largo del Valle del Cauca, este valor permite establecer una línea base frente a diferentes actividades posteriores proyectadas para la cuenca como la desviación del río con el fin de alimentar a Hidroituango, el más grande proyecto hidroeléctrico del país y uno de los cinco más importantes de América Latina.

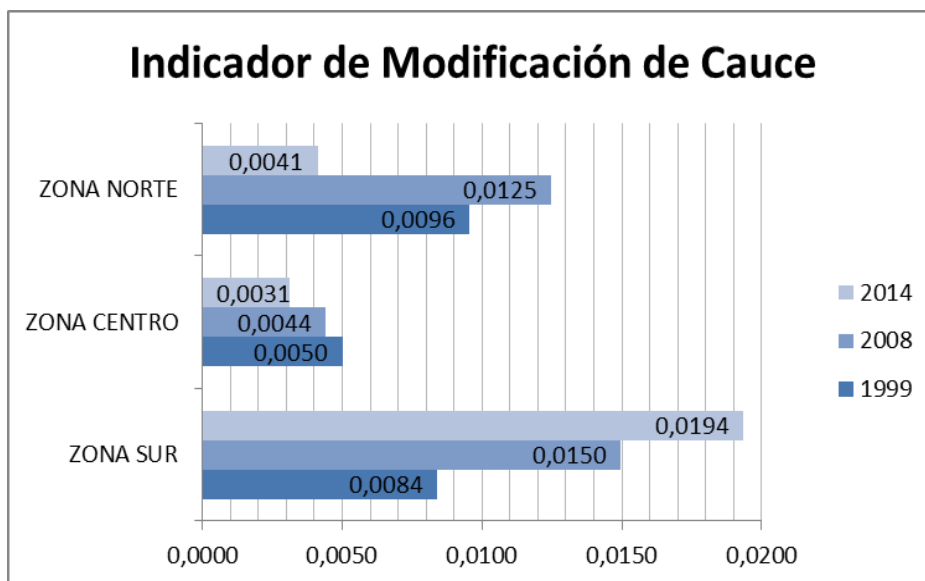


Figura 47 . Indicador de Modificación de Cauce

Propia, 2015

Los resultados obtenidos en el indicador de diseño de cauce disponibles en la Figura 47 corroboran lo presentado en el documento Modelación Matemática del río Cauca donde se estableció un análisis morfológico comparativo entre 1977 y 1998 encontrando que la variación de la relación ancho/profundidad en el período 1978-1998 es mínima, aunque el ancho y la profundidad a banca llena en promedio se han reducido en 9.1 y 7.3 %, respectivamente. Esta disminución en el ancho y la profundidad media a banca llena podría ser una consecuencia de la disminución en los caudales registrados en este período debido al efecto regulador del embalse de Salvajina. El Río Cauca desarrolla diferentes grados de sinuosidad a lo largo de todo su cauce. En términos generales, es posible afirmar que el patrón meándrico no ha variado significativamente en el tiempo, presentando un incremento en la sinuosidad poco importante.

Los resultados permiten establecer que las principales variaciones del cauce fueron presentadas en el sector sur de la cuenca entre el año 2008 y el año 2014.

231

Capítulo 6

23.1 Estimación del Índice antrópico

Una vez obtenidos los indicadores demográficos, de vegetación y de modificación del diseño de cauce, se procede a obtener un índice que refleje las características de drenaje superficial de la cuenca y que en el análisis temporal refleje sus cambios durante casi tres décadas. Para ello las variables que se utilizaron fueron el aumento de la urbanización (aumento de superficies impermeables), la disminución de vegetación natural (capaz de retener grandes volúmenes de agua) y su reemplazo por vegetación plantada o alóctona (con capacidades muy reducidas de retener agua) y la longitud del río (aumento de velocidad de flujo por rectificación).

El objetivo principal es que el índice resultante refleje la lejanía del sistema en los distintos momentos de la historia, del estado natural, desde un punto de vista del drenaje de sus aguas.

El índice reflejará entonces el deterioro de la cuenca, por lo que valores altos indicarán un impacto negativo en el ecosistema fluvial (alejamiento del sistema de su estado natural), mientras que bajos valores del índice indicarán un estado sin incidencia antrópica (cercano al natural).

Para este índice se tiene la siguiente formula:

232

$$\mathbf{IIA = ID * (1 - IV) * IMDC}$$

Dónde:

ID: Indicador Demográfico

IV: Indicador de Vegetación

IMDC: Indicador de Modificación del Diseño del Cauce

Al igual que para los indicadores, el rango del índice IIA es entre 0 y 1. Cuando IIA=0 significa que el sistema está en su estado natural (desde el punto de vista demográfico, de cobertura de vegetación y del diseño del cauce), mientras que el IIA=1 representa el estado de máxima transformación antrópica de la cuenca, y donde el sistema pierde todas sus características naturales.

A partir de esto, y teniendo en cuenta que las variables se encuentran disponibles a una escala regional se propone un Índice de Incidencia Antrópica (IIA) de la CMR a gran escala, a partir de los siguientes indicadores:

	ESTADO NATURAL	ESTADO DE MAXIMO NIVEL ANTRÓPICO
INDICE DE INCIDENCIA ANTRÓPICA (IIA)	IIA = 0	IIA=1
	ID=0	ID = 1
DEMOGRAFICO (ID)	SIN HABITANTES O SIN COBERTURA URBANA, CONDICION APROXIMADA AL AMBIENTE NATURAL	TAMAÑO POBLACIONAL Y COBERTURA URBAN MÁXIMOS
VEGETACIÓN (IV)	IV = 1	IV=0
	MAXIMA COBERTURA DE VEGETACIÓN NATURAL	SIN COBERTURA VEGETAL
DISEÑO DE CAUCE (IMDC)	IMDC=0	IMDC=1
	DISEÑO DEL CAUCE EN MEANDROS	MAXIMA MODIFICACIÓN EN EL DISEÑO DEL CAUCE

Fuente: Propia 2015

A continuación, se presenta los resultados del índice de incidencia antrópica para cada sector de la cuenca:

Tabla 38. Índice de incidencia antrópica IIA para la zona norte del área objeto de estudio

AÑO	INDICADOR DE POBLACION	INDICADOR DE VEGETACION	INDICADOR DE CAUCE	INDICE ANTROPICO
1999	0,02470051	0,365076386	0,009566438	0,00015003
2008	0,01877025	0,325518643	0,0124627	0,00015778
2014	0,01967089	0,269922802	0,004124978	5,92399E-05

Fuente: Propia, 2015

Tabla 39. Índice de incidencia antrópica IIA para la zona centro del

área objeto de estudio

AÑO	INDICADOR DE POBLACION	INDICADOR DE VEGETACION	INDICADOR DE CAUCE	INDICE ANTROPICO
1999	0,0330975	0,371874531	0,005010095	0,000104157
2008	0,02479584	0,389066818	0,004411875	6,68337E-05
2014	0,02381793	0,815509171	0,003140657	1,38006E-05

Fuente: Propia, 2015

Tabla 40. Índice de incidencia antrópica IIA para la zona sur del área objeto de estudio

AÑO	INDICADOR DE POBLACION	INDICADOR DE VEGETACION	INDICADOR DE CAUCE	INDICE ANTROPICO
1999	0,14795817	0,411367297	0,008387097	0,000730458
2008	0,11063812	0,476695931	0,014956012	0,000865914
2014	0,10967045	0,320062564	0,019354839	0,001443272

Fuente: Propia, 2015

Tabla 41. Valor del índice de incidencia antrópica para la cuenca en el Valle del Cauca

INDICE ANTROPICO	1999	2008	2014
ZONA SUR	0,00073046	0,000865914	0,001443272
ZONA CENTRO	0,00010416	6,68337E-05	1,38006E-05
ZONA NORTE	0,00015003	0,00015778	5,92399E-05

Al evaluar los resultados obtenidos en el índice de incidencia antrópica es posible identificar que al encontrarse la mayoría de las ciudades ubicadas en la zona de influencia de la cuenca en un estado de crecimiento poblacional progresivo pero con bastantes problemáticas de desarrollo económico y de orden público, el grado de afectación que ha tenido la cuenca no ha sido relevante frente a su funcionalidad y diseño de cauce, es decir, se encuentra en un desarrollo ecosistémico natural donde hay un mínimo impacto antrópico que afecte su funcionalidad.

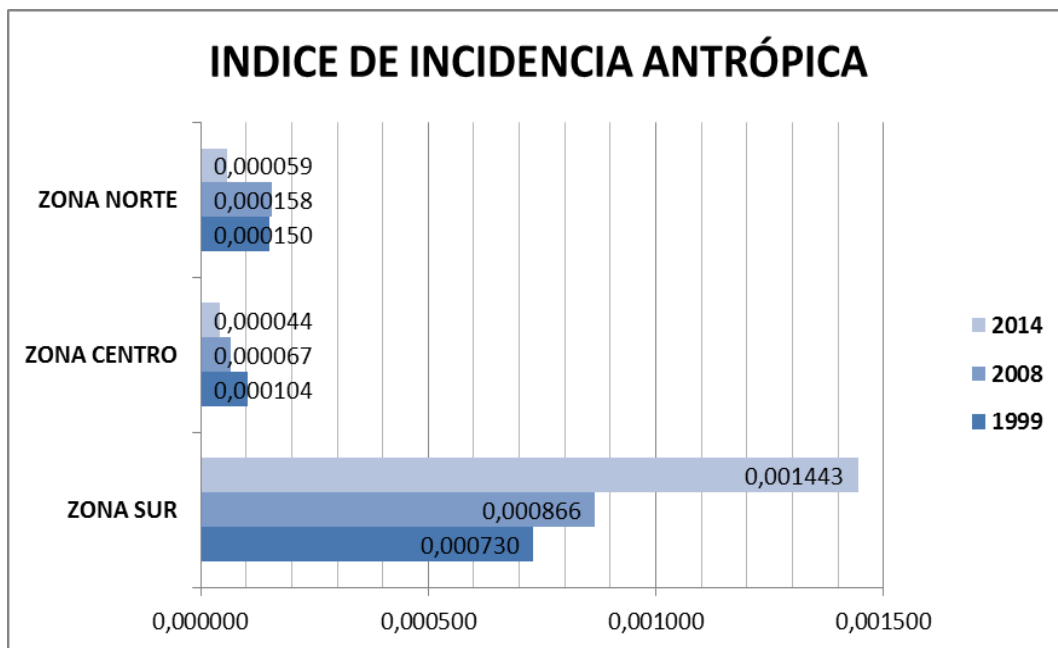


Figura 48. Cálculo del Índice de Incidencia Antrópica

Fuente: Propia, 2015

Al evaluar los resultados obtenidos en la Figura 48 del índice de incidencia antrópica, todos muy cercanos a cero, es posible identificar que a pesar de encontrarse la mayoría de las

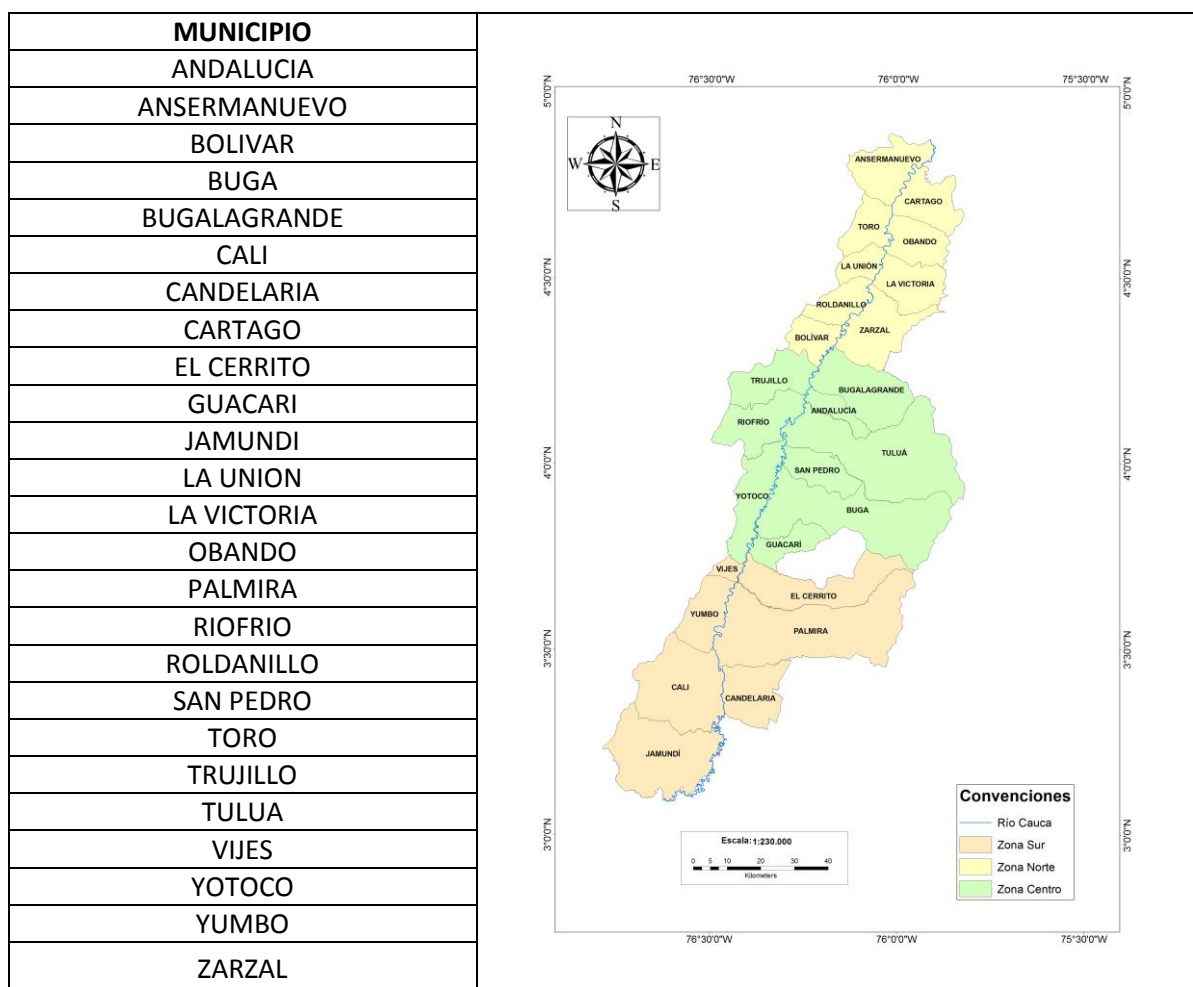
ciudades ubicadas en la zona de influencia de la cuenca en un estado de crecimiento poblacional progresivo, el grado de afectación que ha tenido la cuenca no ha sido tan relevante frente a su funcionalidad y diseño de cauce, es decir, se encuentra en un desarrollo ecosistémico natural donde hay un mínimo impacto antrópico que afecte su funcionalidad, excepto por el sector sur donde se refleja un mayor impacto dado que es donde hay mayor concentración de población y desarrollo económico.

Sin embargo, cabe mencionar que a pesar que en el año 2014 (fecha más reciente) las tres zonas de trabajo presentan un índice bajo, la zona sur ha tenido un incremento considerable en la incidencia antrópica, de acuerdo a estudios realizados por la CVC en el sector de la ciudad de Cali especialmente, son notables los efectos que han causado acciones como las explotaciones mecanizadas y no controladas de material de arrastre, las escombreras ilegales, los vertimientos informales de aguas residuales, además de presentar un alto grado de riesgo ante amenaza sísmica y de inundación de la ciudad, derivado de la posible licuación de suelos y la ruptura del jarillón o dique marginal de protección.

23.2 Índice Antrópico por municipio con influencia directa al Río Cauca.

Con el fin de obtener valores más puntuales de incidencia antrópica que permitan establecer medidas de manejo localizadas, se estableció el cálculo de índice antrópica en aquellos municipios que tienen influencia directa sobre el cauce principal de la cuenca, es decir, los municipios por donde atraviesa el Río Cauca (Tabla 42).

en el Valle del Cauca



Fuente: Propia, 2016

23.2.1 Indicador Demográfico por municipio con influencia directa al Río Cauca.

Tomando como insumo los valores obtenidos por municipio para el cálculo general del indicador demográfico se recopila para analizar el comportamiento del indicador demográfico en aquellos municipios por donde pasa el Río Cauca (Tabla 43).

al Río Cauca

MUNICIPIO	AÑO		
	1999	2008	2014
ANDALUCIA	0,02038004	0,00150113	0,00129021
ANSERMANUEVO	0,03101677	0,00542756	0,00525123
BOLIVAR	0,01728667	0,01275293	0,01267893
BUGA	0,00358066	0,0011693	0,00171677
BUGALAGRANDE	0,00328497	0,00200275	0,00231181
CALI	0,01204196	0,01129879	0,01064246
CANDELARIA	0,0170915	0,01501799	0,01498317
CARTAGO	0,00678321	0,00631318	0,00533751
EL CERRITO	0,00648988	0,0050175	0,00500695
GUACARI	0,01125066	0,00856222	0,0084644
JAMUNDI	0,04344854	0,02081394	0,02069509
LA UNION	0,01704714	0,01685392	0,01698197
LA VICTORIA	0,00520442	0,0065128	0,00661806
OBANDO	0,01277823	0,00377864	0,00448326
PALMIRA	0,0109482	0,00705024	0,00661114
RIOFRIO	0,0190185	0,01597977	0,01563269
ROLDANILLO	0,0052135	0,00564591	0,00553664
SAN PEDRO	0,00884872	0,01399806	0,01393886
TORO	0,00248733	0,00242998	0,00360581
TRUJILLO	0,00658791	0,00281355	0,00303356
TULUA	0,01300323	0,01219484	0,01189534
VIJES	0,01475473	0,01188911	0,01205274
YOTOCO	0,00124252	0,00468593	0,00443596
YUMBO	0,02649203	0,02391655	0,02356931
ZARZAL	0,01246811	0,01007072	0,0099311

Fuente: Propia, 2016

El mayor valor obtenido en el Indicador demográfico corresponde al municipio de Jamundí para el año 1999, según Urrea (1997) Jamundí junto con Candelaria, Palmira, Puerto Tejada y Yumbo, se ha convertido en ciudad “dormitorio” en la cual habita la mano de obra que trabaja en los complejos industriales, el sector de servicios y una parte del sector informal

del área Metropolitana de Cali,, lo cual se ve reflejado en los valores obtenidos en el indicador para el año 1999; el patrón migratorio y la tendencia de urbanización del municipio a generado que el comportamiento demográfico del municipio presente patrones totalmente diferentes a los demás municipios del departamento.

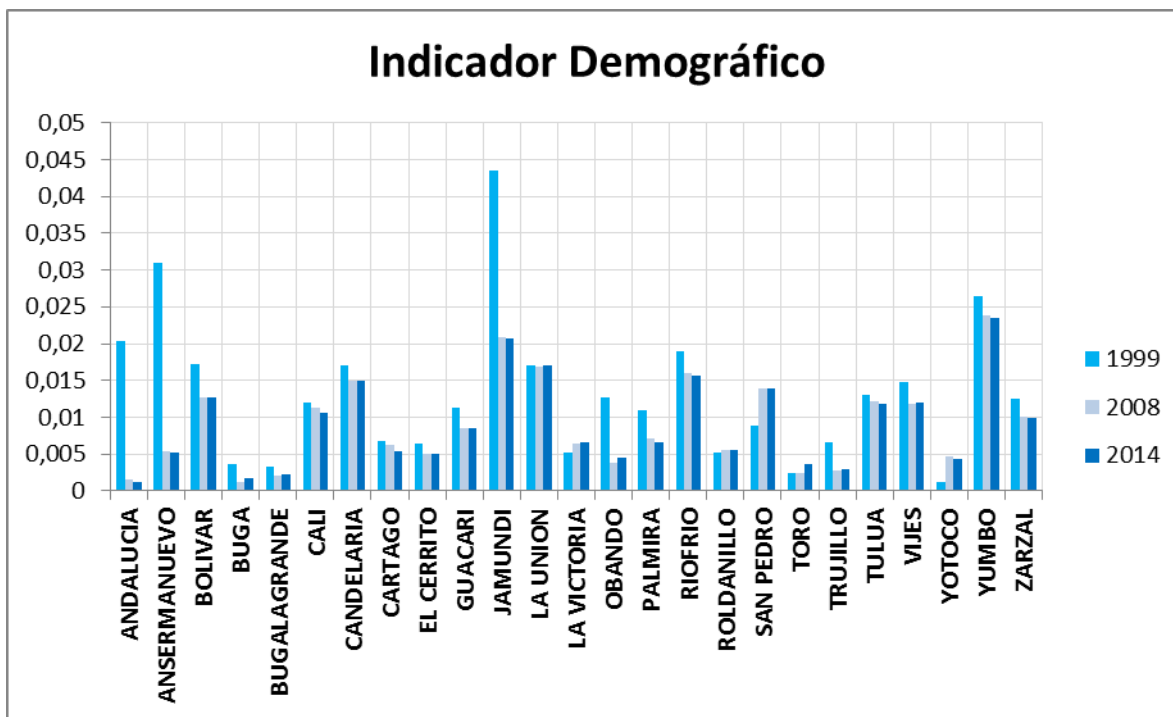


Figura 49. Cálculo del Indicador demográfico por municipio

Fuente: Propia, 2016

En el caso de municipios como Trujillo, entre el año 1999 y 2002 se genera un decrecimiento siendo coincidente con lo que refleja su esquema de ordenamiento territorial, De acuerdo al centro de memoria histórica, entre 1988 y 1994, en los municipios de Trujillo, Bolívar y Riofrío (noroccidente del departamento del Valle) se registraron, según los familiares y organizaciones humanitarias, 342 víctimas de homicidio, tortura y

desaparición forzada como producto de un mismo designio criminal, lo cual redundó en desplazamientos masivos que afectaron todo el noroccidente del departamento del Valle del Cauca.

23.2.2 Indicador de Vegetación por municipio con influencia directa al Río Cauca.

Para realizar el cálculo del Indicador de Vegetación, se estimaron las áreas de cobertura vegetal natural (bosques naturales) y la cobertura de vegetación artificial (plantaciones, cultivos y demás).

Tabla 44. Indicador de Vegetación por municipio con influencia directa al Río Cauca

	1999	2008	2014
Municipio	Indicador de Vegetación	Indicador de Vegetación	Indicador de Vegetación
ANDALUCÍA	0,41872175	0,37798075	0,469299423
ANSERMANUEVO	0,336982908	0,409109566	0,07179542
BOLÍVAR	0,330549501	0,230812674	0,015131526
BUGA	0,437891531	0,523703864	0,652946261
BUGALAGRANDE	0,108420136	0,315168083	0,440992501
CALI	0,32752355	0,421343779	0,057278101
CANDELARIA	0,410232457	0,341083916	0,348600562
CARTAGO	0,34685136	0,394528306	0,272721516
EL CERRITO	0,419397604	0,458290435	0,448713558
GUACARÍ	0,387755296	0,368067297	0,251084625
JAMUNDÍ	0,466148818	0,482898404	0,034686374
LA UNIÓN	0,386575346	0,31163954	0,116269298
LA VICTORIA	0,343411843	0,165689669	0,252540665
OBANDO	0,337351126	0,345888507	0,363744386
PALMIRA	0,424575126	0,510245101	0,49903551
RIOFRÍO	0,290857374	0,305938254	0,368606322
ROLDANILLO	0,371994551	0,249622746	0,149534443
SAN PEDRO	0,320604958	0,310121316	0,591939433
TORO	0,333431805	0,32071866	0,074600937

TRUJILLO	0,291521891	0,307659904	0,136506047
TULUÁ	0,359208433	0,370361237	0,581161798
VIJES	0,432137866	0,378185146	0,035581402
YOTOCO	0,365622989	0,392177346	0,283078051
YUMBO	0,395930354	0,361505775	0,053985371
ZARZAL	0,44272254	0,387269882	0,333002258

Fuente: Propia, 2016

A diferencia de los demás índices, el comportamiento del indicador de vegetación es un poco más homogéneo, es decir, el comportamiento en cuanto a los cambios de cobertura es muy similar en los municipios en estudio, teniendo en cuenta que el análisis del indicador de vegetación radica en que si $IV=1$ el área estará completamente cubierta por vegetación natural (autóctona). El indicador de vegetación disminuye a medida que disminuye la cobertura vegetal con respecto a otras coberturas o a medida que disminuya el área natural con respecto a la cobertura artificial, es evidente que municipios como Buga, Andalucía, Bugalagrande, San Pedro, Palmira y Tuluá han presentado un incremento en la cobertura natural sobre la cobertura artificial, en cambio municipios como Bolívar, Ansermanuevo, Cali, Jamundí, Toro y Yumbo han disminuido considerablemente su cobertura vegetal cambiándola por cultivos plantados.

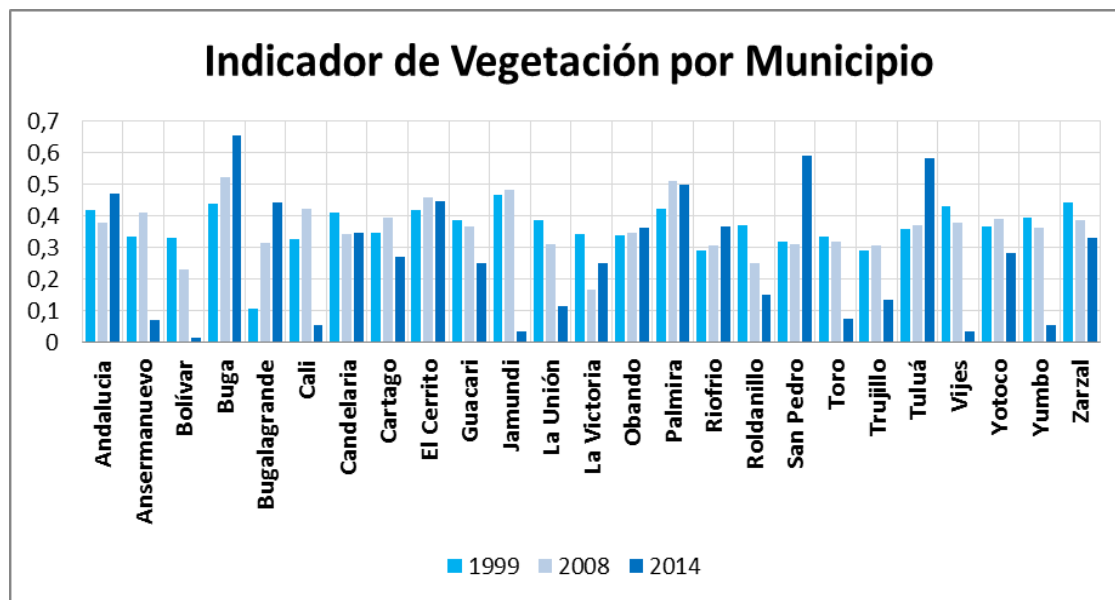


Figura 50. Cálculo del Indicador de Vegetación.

Fuente: Propia, 2016

De acuerdo con expertos de la CVC, se estima que, en el valle geográfico del Río Cauca, que comprende el norte del Cauca, Valle y el centro de Risaralda, se han deforestado 600 mil hectáreas de piedemonte para dedicarlos como tierras de pastos para cría de animales (El Tiempo, 1993).

“Todas las cuencas del Valle tienen problemas de cobertura arbórea y si la relación de bosques protegidos es igual a la cuenca protegida, es lógico que tengamos un problema que, aunque no es evidente ahora, lo vamos a sentir en un futuro próximo”, indicó Carlos Calderón, director de Corpocuenas y coordinador del Consejo Departamental de Agua Potable para un artículo del diario El País, en el año 2007, lo cual explica la tendencia del valor de Vegetación a tener una tendencia a bajar en la mayoría de los municipios

directa al Río Cauca.

Tomando lo valores de cada tramo de la cuenca en cada municipio se realiza el cálculo de la longitud de su cauce para sí calcular el valor del indicador de modificación de cauce por municipio.

Tabla 45. Indicador de modificación de cauce por municipio con influencia directa al Río Cauca

MUNICIPIO	Longitud en Kms				INDICE 1999	INDICE 2008	INDICE 2014
	1977	1999	2008	2014			
ANDALUCIA	8,19	7,65	7,63	8,15	0,065934066	0,068376068	0,004884
ANSERMANUEVO	37,22	36,86	36,71	37,03	0,009672219	0,013702311	0,00510478
BOLIVAR	28,64	26,12	26,05	27,15	0,087988827	0,090432961	0,05202514
BUGA	45,24	45,65	45,13	45,34	0,009062776	0,002431477	0,00221043
BUGALAGRANDE	25,05	26,59	23,84	24,83	0,061477046	0,048303393	0,00878244
CALI	37,64	38,3	38,75	39,29	0,017534538	0,029489904	0,04383634
CANDELARIA	17,86	18,03	18,27	18,41	0,009518477	0,022956327	0,03079507
CARTAGO	29,82	29,48	29,28	29,64	0,011401744	0,018108652	0,00603622
EL CERRITO	9,81	9,73	9,73	9,93	0,008154944	0,008154944	0,01223242
GUACARI	11,56	12,29	12,34	12,65	0,063148789	0,067474048	0,09429066
JAMUNDI	79,05	87,72	88,98	89,53	0,109677419	0,125616698	0,13257432
LA UNION	14,41	14,49	14,49	14,67	0,0055517	0,0055517	0,01804303
LA VICTORIA	12,85	12,89	12,92	13,009	0,00311284	0,005447471	0,01237354
OBANDO	20,3	20,76	20,68	21,13	0,022660099	0,018719212	0,0408867
PALMIRA	41,98	42,47	42,55	43,33	0,011672225	0,013577894	0,03215817
RIOFRIO	33,83	29,69	30,65	30,62	0,122376589	0,093999409	0,0948862
ROLDANILLO	29,56	28,39	28,27	28,83	0,039580514	0,043640054	0,02469553
SAN PEDRO	13,58	14,36	14,43	14,76	0,057437408	0,062592047	0,08689249
TORO	20,45	20,95	20,86	21,23	0,024449878	0,0200489	0,03814181
TRUJILLO	14,006	17,66	14,93	15,47	0,260888191	0,065971726	0,10452663
TULUA	31,18	29,86	29,75	29,55	0,04233483	0,045862733	0,0522771
VIJES	8,43	8,58	8,99	8,76	0,017793594	0,066429419	0,03914591
YOTOCO	75,15	76,79	76,63	77,59	0,021823021	0,019693945	0,0324684

YUMBO	33,32	33,7	33,59	34,33	0,011404562	0,008103241	0,03031212
ZARZAL	42,27	36,69	39,62	40,38	0,132008517	0,062692217	0,04471256

Fuente: Propia, 2016

Los valores obtenidos como indicadores de modificación de cauce reflejan menores a 0,3 reflejan que se han dado variaciones mínimas en el cauce del río, es decir. El río aún conserva su naturaleza meandrica sin presentar cambios sustanciales a causa de obras civiles, siendo el mayor valor el presentado en el municipio de Trujillo para el año 1999 y el menor valor para el municipio de Buga en el año 2014.

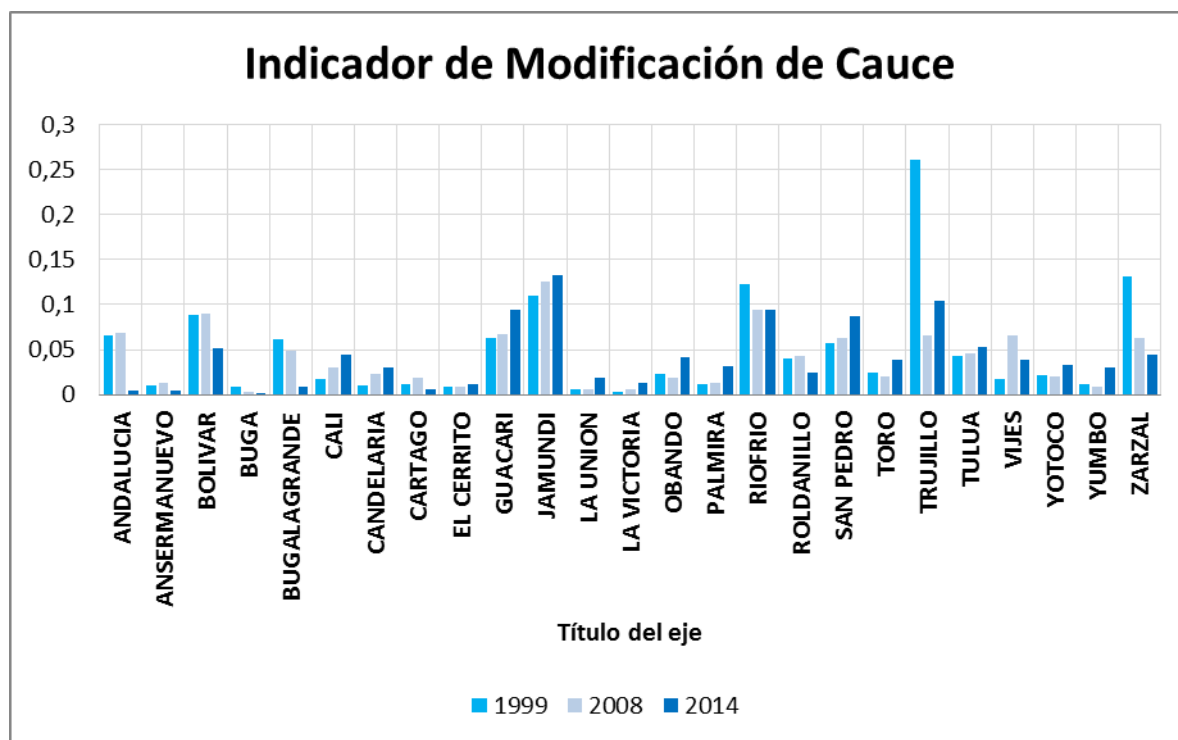


Figura 51. Cálculo del Indicador de Modificación de cauce.

Fuente: Propia, 2016

Los valores obtenidos en la figura 51 presentan que los municipios que mayor variación de cauce presentaron fueron Guacarí, Jamundí, Riofrío y en el año 1999 el municipio de Trujillo, lo cual se refleja en las obras generadas por la CVC para prevenir inundaciones y los efectos de los rompimientos y fallas en las mismas.

De acuerdo a la información presentada por la CVC y en los reportes de medios de comunicación, estos municipios han presentado serias problemáticas en el cauce del río en especial en las épocas de lluvias, tal como es el caso del municipio de Guacarí, el cual según el reporte del diario El País, en el año 2012 sufrió el rompimiento de un dique causando serias afectaciones al municipio debido al desbordamiento del río (Jaramillo (2012).

En el caso del municipio de Trujillo se evidencia una problemática riesgo en el corregimiento de Robledo, encontrándose en conflicto con el río Cauca tal como lo refleja su esquema de ordenamiento Territorial, esto ha generado múltiples inconvenientes en las épocas de desbordamientos de lluvias tal cómo lo ocurrido en el año 1999.

Para el año 1999 de acuerdo a la información suministrada por la CVC en su reporte “La protección contra inundaciones en el Valle del Cauca Historia y nuevo paradigma” presentado en el año 2011, se dieron fuertes inundaciones que generaron serias afectaciones desde la construcción de Salvajina, posteriormente en el año 2008 se generaron nuevas inundaciones que llevan a esta entidad a tomar medidas de control a partir de la modelación

del río con el fin de conocerlo y establecer control y predicción del comportamiento del caudal y su cauce.

23.3 Índice de Incidencia Antrópica por Municipio

A continuación, se presentan los valores obtenidos de índice de Incidencia Antrópica para cada uno de los 25 municipios con influencia directa en el cauce del Río Cauca, este cálculo se realizó a partir de los valores obtenidos en el índice demográfico, de Vegetación y de modificación de Cauce por municipio.

Tabla 46. Índice de Incidencia Antrópica por municipio con influencia directa al Río Cauca

MUNICIPIO	1999	2008	2014
ANDALUCIA	0,00078109	6,3845E-05	3,34415E-06
ANSERMANUEVO	0,00019891	4,3945E-05	2,48818E-05
BOLIVAR	0,00101826	0,00088709	0,000649642
BUGA	1,8241E-05	1,3542E-06	1,317E-06
BUGALAGRANDE	0,00018005	6,625E-05	1,13497E-05
CALI	0,00014199	0,00019281	0,000439805
CANDELARIA	9,5946E-05	0,00022717	0,000300561
CARTAGO	5,0515E-05	6,9219E-05	2,34317E-05
EL CERRITO	3,0728E-05	2,2165E-05	3,37647E-05
GUACARI	0,00043498	0,00036508	0,00059772
JAMUNDI	0,00254397	0,001352	0,002648471
LA UNION	5,8055E-05	6,4408E-05	0,00027078
LA VICTORIA	1,0637E-05	2,96E-05	6,12086E-05
OBANDO	0,00019187	4,6267E-05	0,000116629
PALMIRA	7,3533E-05	4,6883E-05	0,000106506
RIOFRIO	0,00165047	0,00104254	0,000936563
ROLDANILLO	0,00012959	0,00018488	0,000116284
SAN PEDRO	0,0003453	0,00060445	0,000494236
TORO	4,0537E-05	3,3094E-05	0,000127272

TRUJILLO	0,00121767	0,00012851	0,000273803
TULUA	0,00035275	0,00035215	0,000260456
VIJES	0,00014909	0,0004911	0,000455028
YOTOCO	1,7201E-05	5,6093E-05	0,000103257
YUMBO	0,00018251	0,00012374	0,000675867
ZARZAL	0,00091722	0,00038685	0,000296177

Fuente: Propia, 2016

Evidentemente el municipio de Jamundí es el que presenta un mayor Índice de Incidencia antrópica, Ríofrío, Bolívar y Calí siguen en su orden; los municipios que presentan menor valor en el Índice son los ubicados al Noroccidente del departamento tales como Roldanillo, La Unión, La Victoria, Ansermanuevo, Cartago, Obando, esto se debe a que son los municipios que presentan menores impactos en la modificación del cauce, presentan una densidad de población relativamente baja con relación a su capacidad de carga y a pesar de presentar un valor no muy favorable en el indicador de vegetación producto del establecimiento de cultivos agrícolas como el café, no es un impacto tan marcado como se presenta en la zona centro y sur del departamento frente a los cambios de cobertura por el establecimiento de cultivos de caña, ganadería extensiva, extracción de material de arrastre y minería ilegal.

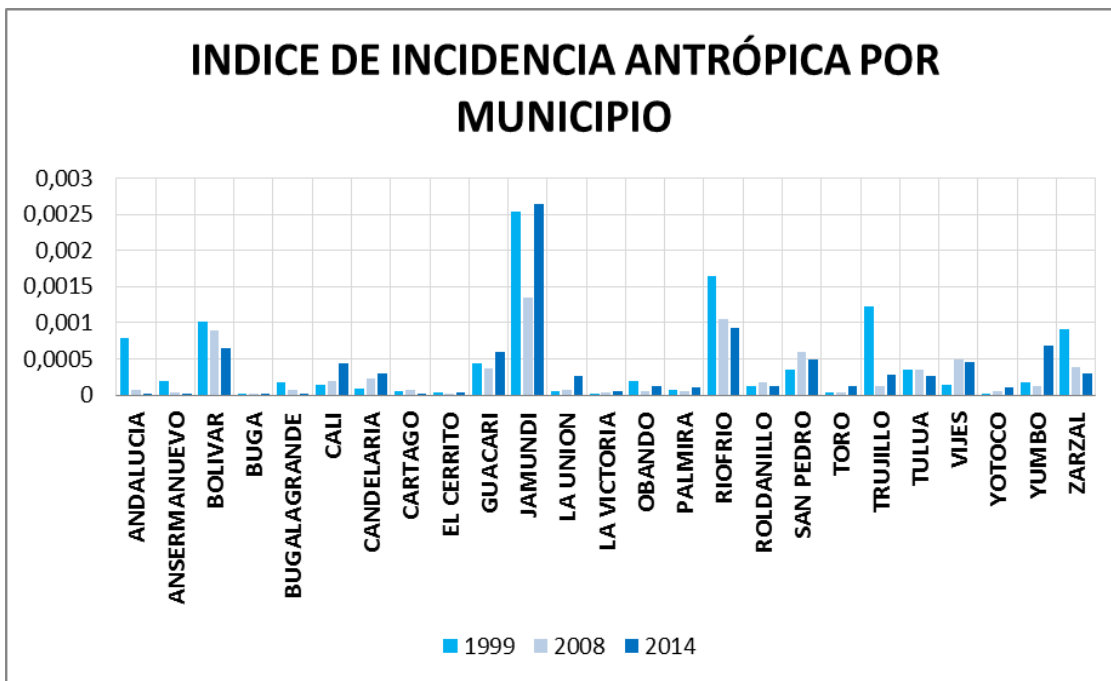


Figura 52. Cálculo del Índice de Incidencia Antrópica por municipio.

Fuente: Propia, 2016

De acuerdo a los reportes dados por los medios y por la CVC municipios como Jamundí han presentado serias afecciones debido a la minería ilegal y explotación de material de arrastre, cabe anotar que el municipio de Jamundí es el que presenta en su jurisdicción la mayor longitud del río Cauca con 89,53 kilómetros para el año 2014, sobre los cuales debido también al crecimiento del cultivo de caña de azúcar se han establecido desviaciones para abastecer los sistemas de riego.

Otro punto de gran importancia es el clima; para el año 2014 el municipio de Jamundí fue uno de los más afectados por la ola invernal, generando desbordamientos serios del río Cauca, además este municipio es quizás el municipio con más problemas de

minería ilegal causando desvíos en el cauce del río, contaminación y 249
deforestaciones de los bosques de ribera (Muñoz, 2007).

Para el año 1999 en el caso del municipio de Trujillo se dio una seria problemática con el rompimiento de uno de los diques de protección, lo cual puede influir en el valor de Índice de incidencia antrópica obtenido para este año.

Cabe resaltar que los valores obtenidos en el índice de incidencia antrópica de todos los municipios fueron considerablemente bajos siendo menores a 0,003, esto indica que el impacto antrópico sobre el cauce es mínimo teniendo en cuenta que la población en la mayoría de los municipios se encuentra en crecimiento exponencial, a que las obras civiles implementadas no han deformado de manera significativa el cauce del río y los cambios de cobertura que es quizá el componente de mayor incidencia representa un problema en algunos de los 25 municipios.

Conclusiones

- Obtener valores del Índice de Incidencia Antrópica permiten tener una lectura más puntual del estado del río Cauca y su relación con el hombre, si bien es cierto los valores obtenidos en el presente estudio han sido bajos, refleja la necesidad de establecer medidas de manejo en algunos municipios que han aumentado considerablemente el impacto sobre la cuenca en el transcurso del tiempo del periodo en estudio, tal es el caso de municipios como Yumbo, Vijes, Guacarí, Candelaria, Cali y Jamundí, los cuales entre el 2008 y 2014 han aumentado la incidencia antrópica sobre el Río Cauca, causado como se ha ilustrado a lo largo del documento, por los cambios en la cobertura, problemáticas con las obras ingenieriles establecidas a lo largo de la cuenca y el establecimiento de asentamientos urbanos en zonas inadecuadas que afectan el cauce del río.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en el indicador de vegetación, municipios como Bolívar, Cali, Jamundí, Yumbo, Vijes, Toro y Roldanillo entre el año 2008 y 2014 han reducido considerablemente la cobertura natural remplazándola por cobertura artificial, es decir, se ha promovido la deforestación en estos municipios dando prelación al establecimiento de nuevos asentamientos urbanos, de la agricultura, ganadería y minería; este resultado permite servir de referente para las autoridades locales frente a la necesidad de fortalecer estrategias de restauración ecológica y de control sobre el aumento de la frontera agrícola teniendo en cuenta la importancia de la cobertura vegetal natural en la regulación hídrica, conservación de

ecosistemas, establecimiento de corredores biológicos valiosísimos para la conservación biológica de fauna y flora y aportes para la reducción del calentamiento global entre otros. 251

- Para municipios como Cali Jamundí, Trujillo, Obando, Palmira, San Pedro, Tuluá, Yumbo y Yotoco, es muy conveniente y oportuno el estudio que está realizando la CVC sobre la modelación del Río Cauca en el Valle del Cauca, esto con el fin de realizar una proyección oportuna de las medidas de manejo y construcción de obras civiles para el control del cauce del río, teniendo en cuenta la tendencia a aumentar la incidencia antrópica sobre la modificación del cauce, esto es causado por los desvíos en el cauce para la agricultura, ganadería, problemáticas con las obras ya existentes, asentamientos urbanos en zonas no adecuadas y minería ilegal como se ha evidenciado en el presente documento y se ha documentado en los medios.
- En cuanto al indicador demográfico, entre el 2008 y 2014 se ha notado un equilibrio en el comportamiento poblacional en los diferentes municipios sin presentarse al año 2014 alguna variación importante, sin embargo frente al momento actual que atraviesa el país desde el conflicto armado, donde varios de los municipios en estudio estuvieron fuertemente marcados por la tendencia al desplazamiento, se considera importante establecer acciones y medidas de contingencia para los cambios que se pueden presentar a futuro ante un posible proceso de paz; el comportamiento de la población puede variar redundando en el retorno de un número importante de habitantes al sector rural, en especial a zonas donde hoy no ha sido posible ser habitadas, la promoción de estas medidas son con el fin de que

se establezcan posibilidades de proyectos productivos y de establecimiento de la comunidad en armonía con los ecosistemas sin alterar la cobertura natural y la contaminación en el cauce. 252

- Los valores obtenidos en el índice de incidencia antrópica cuyo valor máximo fue 0,001443, permiten inferir que a pesar de las acciones antrópicas que se han presentado durante el periodo de estudio, no existe una variación marcada del cauce natural del río Cauca en el Valle del Cauca.
- Al estudiar la distribución espacial y temporal del impacto que el hombre ha tenido sobre la Cuenca del Río Cauca en el departamento del Valle, se puede identificar que en el periodo comprendido entre 2008 y 2014 ha existido una mayor incidencia antrópica especialmente en el sector sur de la cuenca, esto se debe posiblemente a un fenómeno demográfico y social de retornos masivos producto del cambio en las condiciones de orden público que permitió el acceso a las zonas rurales, como lo evidencia este estudio.
- Al analizar los sectores de la cuenca que han sido más afectados se puede identificar que el sector sur de la cuenca del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca ha sido la zona más afectada en los años en especial entre el año 2008 y 2014 esto se debe a la aceleración de prácticas productivas y expansión de los asentamientos urbanos.
- Al estudiar el índice de diseño de cauce se puede afirmar que ha sido mínima la variación del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, esto se debe

principalmente a que a pesar de que el departamento se ha consolidado 253 en el país como un espacio de producción agrícola e industrial, su crecimiento poblacional con relación al área rural no ha sido relevante, encontrándose aún en un estado de crecimiento potencial de la población y asentamientos urbanos.

- El diseño del cauce de la cuenca principal del río Cauca en cuanto a su longitud no se ha visto afectado pese a las actividades antrópicas que se desarrollan en la cuenca, probablemente ha presentado alta variabilidad en su caudal, pero su cauce no se ha modificado considerablemente.
- La vegetación nativa se ha visto disminuida notablemente en la cuenca hidrográfica pese a que la densidad de población en las zonas cercanas a los bosques en estas tres décadas ha disminuido tras el desplazamiento originado por el accionar de grupos armados al margen de la ley y a la expansión de monocultivos a gran escala.
- El contar con datos espaciales y de comportamiento de la cuenca en términos de vegetación, población y su dinámica en el cauce, permiten establecer indicadores que den a conocer los puntos críticos de las cuencas hidrográficas y contribuir a la formulación de políticas públicas de desarrollo, en este caso es evidente la necesidad de establecer estrategias de ordenamiento y proyección del departamento orientado a la reducción en la presión actual existente en el sur de la cuenca teniendo en cuenta que es la zona de la cuenca donde hay una concentración de la población, la modificación de la cobertura de manera progresiva alterando el equilibrio del paisaje y es mayor la variaciones de cauce.

- Para contribuir con la planificación del territorio a partir de estudios como este, es necesario articular la información disponible del estado ecosistémico asociado al río Cauca en el Valle para así poder priorizar las zonas que requieren manejo e implementación de medidas de conservación, en este caso es claro que el sector sur de la cuenca del río Cauca en el Valle del Cauca presenta cambios en el paisaje con una tendencia a predominar las coberturas artificiales, presenta un crecimiento acelerado de la población desde al año 2008 y por ende se refleja un mayor índice de incidencia antrópica.

BADARACCO. R. (2012). Detección de la Salinidad en los Suelos de Cultivos de Algodón usando Imágenes de Satélite en la Costa Norte del Perú. P 38, Consultado el 20 de diciembre de 2015 en:
http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/3071/1/Badaracco_mr.pdf

BASTERRA Indiana. 2011, Teledetección-Imágenes Satelitales-Procesamiento Digital de Imágenes, Departamento de Geociencias, Facultad De Ingeniería – UNNE, Chaco, Argentina.

BIANUCCI SP, RUBERTO AR, DEPETTRIS CA & CLEMENTE MT. 2005. Aplicación de indicadores de impacto ambiental al estudio de calidad de las aguas continentales: caso de la laguna Los Lirios, Resistencia, Argentina. Comunicaciones científicas y Tecnológicas, Resumen T-038. Facultad de Ingeniería UNNE, Resistencia, Chaco, Argentina.

CABRERA, E., G. GALINDO & D.M. VARGAS. 2011. Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia, Nivel Nacional Escalas Gruesa y Escala Fina. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia.

CCRS. 1998. Fundamentals of Remote Sensing Tutorial. Canadian Center of Remote Sensing <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/tutore.html>

CATIE, (n.d. (no date [sin fecha]). Manejo de cuencas Hidrográficas. 256

WORLD VISION. Pág 13. ¹ FAO. (2009). ¿Porque invertir en ordenación de cuencas hidrográficas? Servicios de las cuencas hidrográficas. P 6.

Centro de Memoria Histórica (2008). TRUJILLO una tragedia que no cesa. P.13

CHUVIECO E.1995. Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Barcelona: Ed Ariel. Ciencia. España.

CHUVIECO E. (2006). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Barcelona: Ed Ariel. Ciencia. ISBN-13: 97884333-80728.

CHUVIECO E.(2007). Mirar desde el espacio o mirar hacia otro lado: Tendencias en teledetección y su situación en la geografía española. Doc. Anàl. Geogr. 50: 75-85. España.

CHUVIECO, E. (2010) Fundamentos de Teledetección. Madrid P. 377

CORONADO, L. (2001). Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica. Disponible en: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr/bitstream/handle/2238/434/tesis-digital.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – Universidad del Valle. 2010. Modelación Matemática del Rio Cauca. Cali., Colombia.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)., y 257
Universidad del Valle (2009). Modelación Matemática del Río Cauca. Volumen
VIII, Fase I. Santiago de Cali, 3.1.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC (2014). Guía
Explicativa De La Temática De Cobertura Y Uso Del Suelo. P1

DARDON, J. MORALES,p. La cuenca hidrográfica y su importancia para
la gestión regional del desarrollo sustentable del altiplano occidental de Guatemala.
CENTRO PLURICULTURAL PARA LA DEMOCRACIA C P D. 2002

Departamento Nacional de Estadística – DANE-, series poblacionales de Colombia,
Consultado el 15 de mayo de 2015 en www.dane.gov.co.

El País, (2007). La deforestación pone en riesgo el agua de la región. Reporte del
Diaria el País sin información de redacción. Retomado el 15 de mayo de 2016 en
<http://historico.elpais.com.co/paisonline/notas/Agosto082007/reg01.html>.

El Tiempo, (1993). PIDEN FRENAR DEFORESTACIÓN. Reporte del Diario El
Tiempo sin información de Redacción. Retomado el 15 de mayo de 2016 en:
<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-75658>

ESCOBAR L .2006. Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general
para grandes zonas urbanas. Eure, XXXII (96): 73:98.

FAO, Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra, 2005, página 5.

GARCÍA D. 2006. La escala y su importancia en el análisis espacial. 258
Ecosistemas 15 (3): 7-18. ISBN 1697-2473. Universidad de Oviedo.
[Disponible online en [http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7700/1/ECO_15\(3\)_02.pdf](http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7700/1/ECO_15(3)_02.pdf)].

GARCIA MELENDEZ Eduardo,(2007) Análisis Visual de Imágenes, Universidad de León.

GERALDI, A.PICCOLO, C. PERILLO, G. DELIMITACIÓN Y ESTUDIO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS CON MODELOS HIDROLÓGICOS Instituto de Geografía Universidad de Alicante Investigaciones geográficas, Nº 52 215 - 225 ISSN: 0213-4691

IDEAM, IGAC, IAvH, SINCHI, UAESPNN y CORMAGDALENA. 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá. 72p

IDEAM, IGAC, IAvH, SINCHI, UAESPNN, INVEMAR y UPTC. En prensa. Mapa de coberturas de la Tierra CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000.

IDEAM. (2014), Coberturas de la Tierra. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, consultado el 15 de octubre de 2015. Pagina web de servicios: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>

Geográficos No. 40. Bogotá., Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC-. 2010. Revista Análisis Geográficos No. 44. Bogotá., Colombia.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: Escala 1:250.000: Serie III. México: INEGI. 2009. P. 7

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, México.

Jaramillo J. (2012). Desbordamiento del río Cauca causó estragos en Guacarí. Diario El País. Recuperado el 11 de mayo de 2016 en <http://www.elpais.com.co/elpais/invierno/fotos/desbordamiento-del-rio-cauca-causo-estragos-en-guacari>

KOLLNER Labraña & CIA LTDA (2013). Utilización de la teledetección en el estudio de trazados lineales para obras civiles., Santiago Centro. Chile, sp.

KOOMEN, E.; STILLWELL, J. 2007. Modelling Land-Use Change. Theories and methods. En: Modelling Land-Use Change. Progress and Applications. GeoJournal Library. Vol. 90. Pp: 1-21.

KOOMEN, E.; STILLWELL, J.; BAKEMA, A.; SCHOLTEN, H.J. 260

2007. Modelling Land-Use Change. Progress and Applications. GeoJournal Library. Vol. 90, Pp:414

LILLESAND, T.; KIEFER, R. 1999. Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, USA. Cuarta edición. 724p.

LONDOÑO, C. CUENCAS HIDROGRÁFICAS. Universidad del Tolima. 2001. P 60.

Núñez C, Madero E. (2009). Cambios en coberturas de áreas y usos del suelo en tres humedales en el Valle del Cauca. Acta Agronómica, Vol. 58, Núm. 4

MARTINEZ, J., MARTIN, M.P., (2010). Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. Red Nacional de Teledetección Ambiental. P. 9

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Guía Técnica Para La Formulación De Los Planes De Ordenación Y Manejo De Cuencas Hidrográficas. Versión 1.0. 2013. P 18

Muñoz, J. (2007). El Valle, una 'mina' de riesgos. El País, Recuperado el 11 de mayo de 2016 en: <http://historico.elpais.com.co/paionline/notas/Octubre212007/mina.html>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO - . 2005, Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra, www.fao.org.

PEREZ, C. (2006). Teledetección: Nociones y Aplicaciones. p38

QUAÍNI K. 2011. Análisis Espacio-Temporal de Un Índice De 261
Incidencia Antrópica En La Cuenca La Matanza Riachuelo, Provincia De
Buenos Aires. Córdoba. Argentina.

REUTER, F.(2009). Principios de Teldetección. Facultad de Ciencias Forestales.
Universidad Nacional de Santiago. p.6

RODRÍGUEZ LM, Escobar Jaramillo LA & PA Capote (2010) Estimación de un
índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. Revista de Geografía
Norte Grande, 45: 77-95. [Disponible online en:
http://www.geo.puc.cl/html/revista/PDF/RGNG_N45/art06.pdf].

Sandoval M. (2011). La protección contra inundaciones en el Valle del Cauca
Historia y nuevo paradig. CVC.P-16

SARRIA, F.(2010). Análisis temporal de los cambios de usos del suelo en la cuenca
del Segura mediante teledetección. Implicaciones sobre la degradación. Vol. 24, Nº. 3-4.

SATELMAC. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio.P.9

SERVICIO GEOLOGICO DE ESTADOS UNIDOS, USGS, www.usgs.gov,
landsat.usgs.gov/landsat8.php

Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC-, Revisado el 17 de octubre
de 2015.Consultado en: www.siac.gov.co.

Torres, M (2013). La geografía económica del valle del cauca. Cali: Revista de
Economía & Administración, Vol. 10 No. 1. Enero – Junio.

81. n.d. (no date [sin fecha]). Página web de la universidad de Murcia.
<http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf>

UMAÑA, E. Manejo De Cuencas Hidrográficas Y Protección De Fuentes De Agua.
Universidad Agraria. SAN NICOLAS, ESTELI. 2002.

VALES. J.J., CARPINTERO,I.R., L. GRANADO, E. y otros (2010). Estudio de áreas afectadas de Inundación en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete a partir de imágenes radar del satélite Terrasar-x. Rediam., La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 587-596.

VALPREDA. C. GUDIÑO Elina y otros. La evaluación de impacto ambiental y el Ordenamiento Territorial. Trabajo publicado en la Revista Proyección N° 2, editada por CIFOT, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, 2002.

Anexo A. Metadato imágenes Constelación Landsat TM 5

<i>Landsat TM 5 (Path 9 - Row 57)</i>	<i>Landsat TM 5 (Path 9 - Row 57)</i>
<i>Fecha de Adquisición: 1999-07-10</i>	<i>Fecha de Adquisición: 1999-07-10</i>
<i>SUN_AZIMUTH = 57.82582758</i>	<i>SUN_AZIMUTH = 57.82582758</i>
<i>SUN_ELEVATION = 53.22489326</i>	<i>SUN_ELEVATION = 53.22489326</i>
<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 193.000</i>	<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 193.000</i>
<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -1.520</i>	<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -1.520</i>
<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 365.000</i>	<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 365.000</i>
<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -2.840</i>	<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -2.840</i>
<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 264.000</i>	<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 264.000</i>
<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -1.170</i>	<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -1.170</i>
<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 221.000</i>	<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 221.000</i>
<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -1.510</i>	<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -1.510</i>
<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 30.200</i>	<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 30.200</i>
<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.370</i>	<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.370</i>
<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 15.303</i>	<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 15.303</i>
<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = 1.238</i>	<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = 1.238</i>
<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 16.500</i>	<i>RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 16.500</i>
<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.150</i>	<i>RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.150</i>



Separabilidad ROIs, Landsat 1999

ROI Separability Report

File

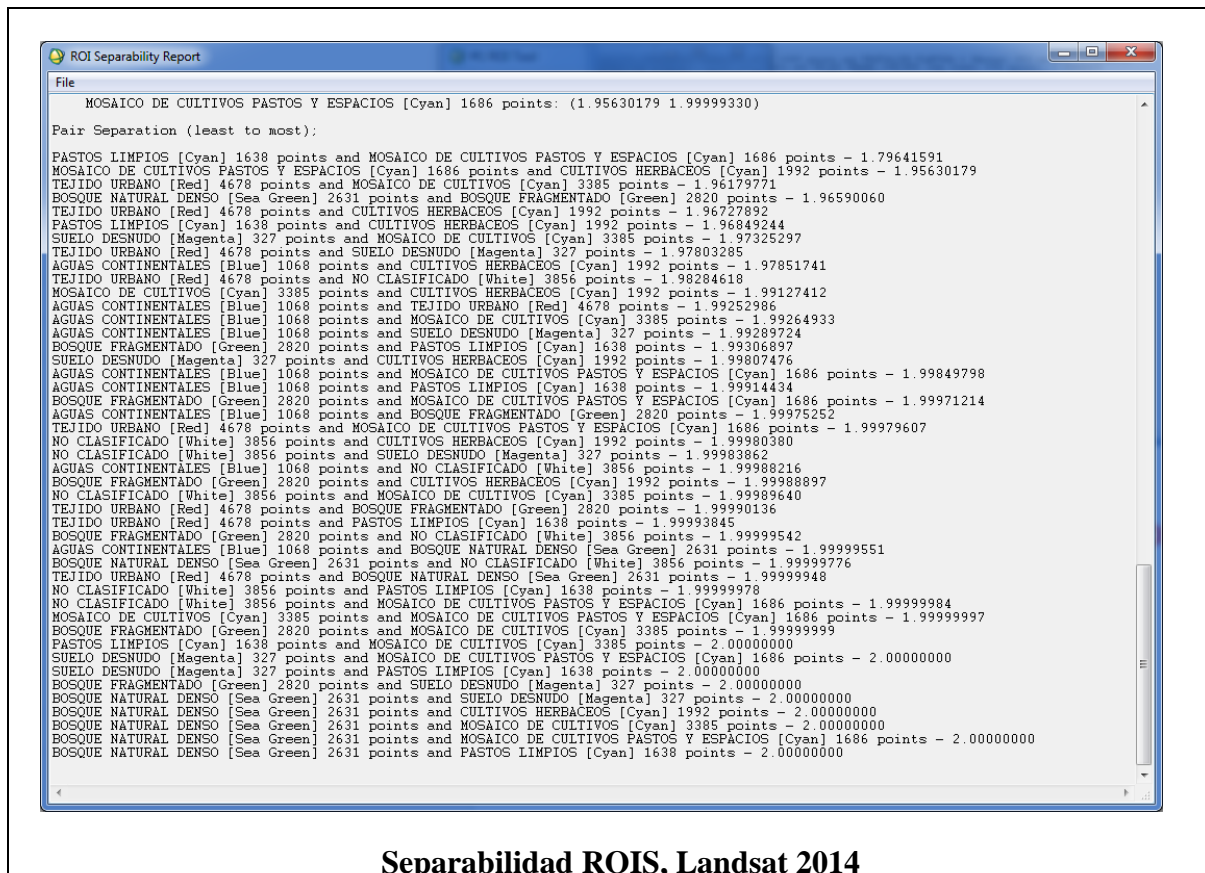
Pair Separation (least to most):

```

TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points and AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points - 1.93333997
TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points and SUELO DESNUDO [Red] 170 points - 1.95888000
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points - 1.96724561
SUELO DESNUDO [Red] 170 points and PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points - 1.96803514
TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points and PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points - 1.97339770
BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points and BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points - 1.97385203
PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 1.98223419
AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points and SUELO DESNUDO [Red] 170 points - 1.98576123
BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points and MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points - 1.98744677
BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points and SUELO DESNUDO [Red] 170 points - 1.99709260
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and SUELO DESNUDO [Red] 170 points - 1.99762758
BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points and SUELO DESNUDO [Red] 170 points - 1.99802395
TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 1.99816951
AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points and BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points - 1.99827425
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points - 1.99862012
TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points and BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points - 1.99873434
NO CLASIFICADO [White] 4171 points and SUELO DESNUDO [Red] 170 points - 1.99892720
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points - 1.99931107
SUELO DESNUDO [Red] 170 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 1.99933496
SUELO DESNUDO [Red] 170 points and MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points - 1.99961137
AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points and PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points - 1.99969514
AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points and MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points - 1.99975136
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points - 1.99986669
TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points and MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points - 1.99988746
TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points and BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points - 1.99991578
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points - 1.99994215
BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points and PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points - 1.99999317
MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points and PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points - 1.99999836
BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points and PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points - 2.00000000
AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 2.00000000
MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 2.00000000
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 2.00000000
BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points and AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points - 2.00000000
BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points and MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points - 2.00000000
BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 2.00000000
NO CLASIFICADO [White] 4171 points and BOSQUE NATURAL FRAGMENTADO [Green] 3383 points - 2.00000000
NO CLASIFICADO [White] 4171 points and AGUAS CONTINENTALES [Blue] 2571 points - 2.00000000
NO CLASIFICADO [White] 4171 points and MOSAICO DE CULTIVOS [Cyan] 3641 points - 2.00000000
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points - 2.00000000
NO CLASIFICADO [White] 4171 points and BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points - 2.00000000
BOSQUE NATURAL DENSO [Sea Green] 2942 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 2.00000000
TEJIDO URBANO CONTINUO [Purple] 4410 points and NO CLASIFICADO [White] 4171 points - 2.00000000
CULTIVOS PERMANENTES HERBÁCEOS [Coral] 1015 points and NO CLASIFICADO [White] 4171 points - 2.00000000
NO CLASIFICADO [White] 4171 points and PASTOS LIMPIOS [Cyan] 1571 points - 2.00000000
NO CLASIFICADO [White] 4171 points and MOSAICO DE CULTIVOS PASTOS [Cyan] 203 points - 2.00000000

```

Separabilidad ROIS, Landsat 2008



Separabilidad ROIS, Landsat 2014

Anexo C. Matriz de confusión – Landsat 1999

Class Confusion Matrix						
File						
Confusion Matrix: D:\TESISMAESTRIA2\TESISPZ\NUEVA_TESIS\CLASIFICACION 1999\CORTE99\						
Overall Accuracy = (2077/2166) 95.8910%						
Kappa Coefficient = 0.9519						
Ground Truth (Pixels)						
Class	cultivos	herbustos	limpio	suelo desnudo	bosque natural	tejido urbano
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Class 1	74	0	0	0	38	17
Class 2	0	41	0	0	0	0
Class 3	0	0	132	0	0	0
Class 4	0	0	0	166	13	0
Class 5	0	0	0	0	471	0
Class 6	0	0	0	0	0	0
Class 7	0	0	0	0	0	0
Class 8	0	0	0	0	0	0
Class 9	0	0	0	0	0	14
Class 10	0	0	0	0	0	7
Total	74	41	132	204	522	522
Ground Truth (Pixels)						
Class	bosque natural	aguas continentales	mosaico de cultivos	mosaico de agua	clases	clasificadas
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Class 1	0	0	0	0	0	0
Class 2	0	0	0	0	0	0
Class 3	0	0	0	0	0	0
Class 4	0	0	0	0	0	0
Class 5	0	0	0	0	0	0
Class 6	306	0	0	0	0	0
Class 7	0	384	0	0	0	0
Class 8	0	0	66	0	0	0
Class 9	0	0	0	107	0	0
Class 10	0	0	0	0	0	330
Total	306	384	66	107	330	330
Ground Truth (Pixels)						
Class	Total					
Unclassified	0					
Class 1	129					
Class 2	41					
Class 3	132					
Class 4	179					
Class 5	471					
Class 6	306					
Class 7	384					
Class 8	66					
Class 9	121					

Class Confusion Matrix						
File						
Ground Truth (Percent)						
Class	cultivos	herbustos	limpio	suelo desnudo	bosque natural	tejido urbano
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 1	100.00	0.00	0.00	0.00	18.63	3.26
Class 2	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 3	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
Class 4	0.00	0.00	0.00	0.00	81.37	2.49
Class 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.23
Class 6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.68
Class 10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.34
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ground Truth (Percent)						
Class	bosque natural	aguas continentales	mosaico de cultivos	mosaico de agua	clasificada	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 6	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 7	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 8	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
Class 9	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
Class 10	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ground Truth (Percent)						
Class	Total					
Unclassified	0.00					
Class 1	5.96					
Class 2	1.89					
Class 3	6.09					
Class 4	8.26					
Class 5	21.75					
Class 6	14.13					
Class 7	17.73					
Class 8	3.05					
Class 9	5.59					
Class 10	15.56					
Total	100.00					

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Class 1	42.64	0.00	55/129	0/74
Class 2	0.00	0.00	0/41	0/41
Class 3	0.00	0.00	0/132	0/132
Class 4	7.26	18.63	13/179	38/204
Class 5	0.00	9.77	0/471	51/522
Class 6	0.00	0.00	0/306	0/306
Class 7	0.00	0.00	0/384	0/384
Class 8	0.00	0.00	0/66	0/66
Class 9	11.57	0.00	14/121	0/107
Class 10	2.08	0.00	7/337	0/330

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Class 1	100.00	57.36	74/74	74/129
Class 2	100.00	100.00	41/41	41/41
Class 3	100.00	100.00	132/132	132/132
Class 4	81.37	92.74	166/204	166/179
Class 5	90.23	100.00	471/522	471/471
Class 6	100.00	100.00	306/306	306/306
Class 7	100.00	100.00	384/384	384/384
Class 8	100.00	100.00	66/66	66/66
Class 9	100.00	88.43	107/107	107/121
Class 10	100.00	97.92	330/330	330/337

Anexo D- Matriz de confusión – Landsat 2008

Class Confusion Matrix					
File					
Confusion Matrix: D:\TESISMAESTRIA2\TESISPAZ\NUEVA_TESIS\CLASIFICACIÓN 2008 2\CORT					
Overall Accuracy = (32692/34936) 93.5768%					
Kappa Coefficient = 0.8093					
Ground Truth (Pixels)					
Class	bosque nativo	mosaico de cu	Tejido Urbano	bosque natural	suelo desnudo
Unclassified	0	0	0	0	0
BOSQUE NATURA	558	0	0	0	1
MOSAICO DE CU	0	1330	182	0	0
TEJIDO URBANO	0	0	27393	0	1
BOSQUE NATURA	0	3	54	1340	0
SUELO DESNUDO	1	0	1065	2	901
AGUAS CONTINE	0	0	1	0	0
PASTOS LIMPIO	0	0	66	0	0
NO CLASIFICAD	0	0	0	0	0
MOSAICO DE CU	0	0	0	0	0
CULTIVOS PERM	0	0	523	0	0
Total	559	1333	29284	1342	903
Ground Truth (Pixels)					
Class	aguas contine	pastos limpio	no clasificad	mosaico de cu	cultivos herb
Unclassified	0	0	0	0	0
BOSQUE NATURA	0	0	0	0	0
MOSAICO DE CU	0	0	0	340	0
TEJIDO URBANO	4	0	0	0	0
BOSQUE NATURA	0	0	0	0	0
SUELO DESNUDO	1	0	0	0	0
AGUAS CONTINE	114	0	0	0	0
PASTOS LIMPIO	0	122	0	0	0
NO CLASIFICAD	0	0	397	0	0
MOSAICO DE CU	0	0	0	0	0
CULTIVOS PERM	0	0	0	0	537
Total	119	122	397	340	537
Ground Truth (Pixels)					
Class	Total				
Unclassified	0				
BOSQUE NATURA	559				
MOSAICO DE CU	1852				
TEJIDO URBANO	27398				
BOSQUE NATURA	1397				
SUELO DESNUDO	1970				
AGUAS CONTINE	115				
PASTOS LIMPIO	188				
NO CLASIFICAD	397				
MOSAICO DE CU	0				

Class Confusion Matrix						
File						
Ground Truth (Percent)						
Class	bosque nativo	mosaico de cu	Tejido Urbano	bosque natural	suelo desnudo	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BOSQUE NATURA	99.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
MOSAICO DE CU	0.00	99.77	0.62	0.00	0.00	0.00
TEJIDO URBANO	0.00	0.00	93.54	0.00	0.00	0.11
BOSQUE NATURA	0.00	0.23	0.18	99.85	0.00	0.00
SUELO DESNUDO	0.18	0.00	3.64	0.15	99.78	0.00
AGUAS CONTINE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PASTOS LIMPIO	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00
NO CLASIFICAD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MOSAICO DE CU	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CULTIVOS PERM	0.00	0.00	1.79	0.00	0.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ground Truth (Percent)						
Class	aguas contine	pastos limpio	no clasificad	mosaico de cu	cultivos herb	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BOSQUE NATURA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MOSAICO DE CU	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
TEJIDO URBANO	3.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BOSQUE NATURA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUELO DESNUDO	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AGUAS CONTINE	95.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PASTOS LIMPIO	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO CLASIFICAD	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
MOSAICO DE CU	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CULTIVOS PERM	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ground Truth (Percent)						
Class	Total					
Unclassified	0.00					
BOSQUE NATURA	1.60					
MOSAICO DE CU	5.30					
TEJIDO URBANO	78.42					
BOSQUE NATURA	4.00					
SUELO DESNUDO	5.64					
AGUAS CONTINE	0.33					
PASTOS LIMPIO	0.54					
NO CLASIFICAD	1.14					
MOSAICO DE CU	0.00					
CULTIVOS PERM	3.03					
Total	100.00					

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
BOSQUE NATURA	0.18	0.18	1/559	1/559
MOSAICO DE CU	28.19	0.23	522/1852	3/1333
TEJIDO URBANO	0.02	6.46	5/27398	1891/29284
BOSQUE NATURA	4.08	0.15	57/1397	2/1342
SUELO DESNUDO	54.26	0.22	1069/1970	2/903
AGUAS CONTINE	0.87	4.20	1/115	5/119
PASTOS LIMPIO	35.11	0.00	66/188	0/122
NO CLASIFICAD	0.00	0.00	0/397	0/397
MOSAICO DE CU	0.00	100.00	0/0	340/340
CULTIVOS PERM	49.34	0.00	523/1060	0/537

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
BOSQUE NATURA	99.82	99.82	558/559	558/559
MOSAICO DE CU	99.77	71.81	1330/1333	1330/1852
TEJIDO URBANO	93.54	99.98	27393/29284	27393/27398
BOSQUE NATURA	99.85	95.92	1340/1342	1340/1397
SUELO DESNUDO	99.78	45.74	901/903	901/1970
AGUAS CONTINE	95.80	99.13	114/119	114/115
PASTOS LIMPIO	100.00	64.89	122/122	122/188
NO CLASIFICAD	100.00	100.00	397/397	397/397
MOSAICO DE CU	0.00	0.00	0/340	0/0
CULTIVOS PERM	100.00	50.66	537/537	537/1060

<

Anexo E- Matriz de confusión – Landsat 2014

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: C:\TRABAJO DE GRADO\2014\ENSAYOCLAU2014

Overall Accuracy = (23571/24081) 97.8821%

Kappa Coefficient = 0.9757

Ground Truth (Pixels)

Class	AGUAS CONTINENTE	TEJIDO URBANO	BOSQUE NATURA	BOSQUE FRAGMENTADO	SUELO DESNUDO	PASTOS LIMPIOS	MOSAICO DE CU	MOSAICO DE CU	CULTIVOS HERBACEOS
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGUAS CONTINENTE	1045	0	0	0	1	0	0	0	0
TEJIDO URBANO	1	4570	0	0	1	0	0	0	36
BOSQUE NATURA	0	0	2528	0	2	0	0	0	0
BOSQUE FRAGMENTADO	0	0	102	2812	0	0	0	0	0
NO CLASIFICADO	1	29	1	0	0	0	0	0	3819
SUELO DESNUDO	0	18	0	0	0	0	0	0	0
PASTOS LIMPIOS	2	0	0	4	0	0	0	0	0
MOSAICO DE CU	0	24	0	0	0	0	0	0	0
MOSAICO DE CU	7	0	0	0	0	0	0	0	0
CULTIVOS HERBACEOS	12	37	0	0	0	0	0	0	0
Total	1068	4678	2631	2820	3856				

Ground Truth (Pixels)

Class	SUELO DESNUDO	PASTOS LIMPIOS	MOSAICO DE CU	MOSAICO DE CU	CULTIVOS HERBACEOS
Unclassified	0	0	0	0	0
AGUAS CONTINENTE	3	0	6	0	19
TEJIDO URBANO	0	2	34	4	1
BOSQUE NATURA	0	0	0	0	0
BOSQUE FRAGMENTADO	0	0	0	0	0
NO CLASIFICADO	0	0	0	0	0
SUELO DESNUDO	324	0	6	0	0
PASTOS LIMPIOS	0	1548	0	19	1
MOSAICO DE CU	0	0	3335	0	10
MOSAICO DE CU	0	58	0	1631	2
CULTIVOS HERBACEOS	0	30	4	32	1959
Total	327	1638	3385	1686	1992

Ground Truth (Pixels)

Class	Total
Unclassified	0
AGUAS CONTINENTE	1075
TEJIDO URBANO	4649
BOSQUE NATURA	2530
BOSQUE FRAGMENTADO	2914
NO CLASIFICADO	3850
SUELO DESNUDO	348
PASTOS LIMPIOS	1574
MOSAICO DE CU	3369
MOSAICO DE CU	1698
CULTIVOS HERBACEOS	2074

Class Confusion Matrix

File

Ground Truth (Percent)

Class	AGUAS CONTINENTE	TEJIDO URBANO	BOSQUE NATURA	BOSQUE FRAGMENTADO	SUELO DESNUDO	PASTOS LIMPIOS	MOSAICO DE CU	MOSAICO DE CU	CULTIVOS HERBACEOS
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AGUAS CONTINENTE	97.85	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJIDO URBANO	0.09	97.69	0.00	0.04	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00
BOSQUE NATURA	0.00	0.00	96.09	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BOSQUE FRAGMENTADO	0.00	0.00	3.88	99.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO CLASIFICADO	0.09	0.62	0.04	0.00	99.04	0.00	0.00	0.00	0.00
SUELO DESNUDO	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PASTOS LIMPIOS	0.19	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MOSAICO DE CU	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MOSAICO DE CU	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CULTIVOS HERBACEOS	1.12	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00				

Ground Truth (Percent)

Class	SUELO DESNUDO	PASTOS LIMPIOS	MOSAICO DE CU	MOSAICO DE CU	CULTIVOS HERBACEOS
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AGUAS CONTINENTE	0.92	0.00	0.18	0.00	0.95
TEJIDO URBANO	0.00	0.12	1.00	0.24	0.05
BOSQUE NATURA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BOSQUE FRAGMENTADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO CLASIFICADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUELO DESNUDO	99.08	0.00	0.18	0.00	0.00
PASTOS LIMPIOS	0.00	94.51	0.00	1.13	0.05
MOSAICO DE CU	0.00	0.00	98.52	0.00	0.50
MOSAICO DE CU	0.00	3.54	0.00	96.74	0.10
CULTIVOS HERBACEOS	0.00	1.83	0.12	1.90	98.34
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Percent)

Class	Total
Unclassified	0.00
AGUAS CONTINENTE	4.46
TEJIDO URBANO	19.31
BOSQUE NATURA	10.51
BOSQUE FRAGMENTADO	12.10
NO CLASIFICADO	15.99
SUELO DESNUDO	1.45
PASTOS LIMPIOS	6.54
MOSAICO DE CU	13.99
MOSAICO DE CU	7.05
CULTIVOS HERBACEOS	8.61
Total	100.00

The screenshot shows a window titled "Class Confusion Matrix" with a menu bar containing "File". The window displays two tables of classification performance metrics for ten different land use classes. The first table shows Commission and Omission rates in percent and pixels. The second table shows Producer's Accuracy (Prod. Acc.) and User's Accuracy (User Acc.) in percent and pixels.

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
AGUAS CONTINE	2.79	2.15	30/1075	23/1068
TEJIDO URBANO	1.70	2.31	79/4649	108/4678
BOSQUE NATURA	0.08	3.91	2/2530	103/2631
BOSQUE FRAGME	3.50	0.28	102/2914	8/2820
NO CLASIFICAD	0.81	0.96	31/3850	37/3856
SUELO DESNUDO	6.90	0.92	24/348	3/327
PASTOS LIMPIO	1.65	5.49	26/1574	90/1638
MOSAICO DE CU	1.01	1.48	34/3369	50/3385
MOSAICO DE CU	3.95	3.26	67/1698	55/1686
CULTIVOS HERB	5.54	1.66	115/2074	33/1992

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
AGUAS CONTINE	97.85	97.21	1045/1068	1045/1075
TEJIDO URBANO	97.69	98.30	4570/4678	4570/4649
BOSQUE NATURA	96.09	99.92	2528/2631	2528/2530
BOSQUE FRAGME	99.72	96.50	2812/2820	2812/2914
NO CLASIFICAD	99.04	99.19	3819/3856	3819/3850
SUELO DESNUDO	99.08	93.10	324/327	324/348
PASTOS LIMPIO	94.51	98.35	1548/1638	1548/1574
MOSAICO DE CU	98.52	98.99	3335/3385	3335/3369
MOSAICO DE CU	96.74	96.05	1631/1686	1631/1698
CULTIVOS HERB	98.34	94.46	1959/1992	1959/2074