

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA Y LOS USOS DEL SUELO EN LA REGIÓN DE LA MOJANA

Autor:

ALEJANDRO FRANCO ROJAS

Ingeniero Civil

Código: 295353

Director del proyecto:

NELSON OBREGÓN NEIRA

(IC, MSc, PhD)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA CURRICULAR DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA - RECURSOS HIDRÁULICOS
Bogotá D. C., Junio de 2011

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA Y LOS USOS DEL SUELO EN LA REGIÓN DE LA MOJANA

ALEJANDRO FRANCO ROJAS

Código: 295353

Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Recursos Hidráulicos

Director:

NELSON OBREGÓN NEIRA

(IC, MSc, PhD)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA CURRICULAR DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA - RECURSOS HIDRÁULICOS
Bogotá D. C., Junio de 2011

FORMATO ÚNICO PARA ENTREGA DE LOS TRABAJOS DE GRADO

TÍTULO EN ESPAÑOL:

Diseño e implementación de un modelo conceptual para la gestión integral del agua y los usos del suelo en la región de La Mojana.

TÍTULO EN INGLÉS:

Design of a conceptual model its implementation for the integrated management of the water resources and land use in the region of La Mojana.

RESUMEN EN ESPAÑOL:

La región de La Mojana se caracteriza por tener un complejo sistema hídrico, un fuerte desequilibrio social y ambiental, y por presentar frecuentes inundaciones de gran magnitud que condicionan las actividades productivas y limitan la calidad de vida de sus habitantes.

En un esfuerzo por aportar a la sostenibilidad de esta región, se diseñó un modelo conceptual que permitiera identificar tendencias, evaluar alternativas de gestión y formular escenarios alternativos, buscando la preservación del ecosistema y mejorar la calidad de vida sin alterar la identidad de La Mojana como sistema.

Desde un enfoque sistémico se encontraron los elementos conceptuales y metodológicos necesarios para estudiar sistemas complejos como la región de La Mojana, que se caracterizan fundamentalmente por las interrelaciones internas y externas entre componentes tales como el suelo, el clima, la biota, las costumbres de la población y el sistema hídrico.

Se utilizaron herramientas de diagnóstico rural participativo, encuestas, entrevistas, minería de datos y autómatas celulares para caracterizar la región, identificar patrones de variables y diseñar el modelo que simula la dinámica de los usos del suelo a partir reglas sencillas que relacionan dichos usos con el régimen hídrico y las dinámicas de poblamiento.

Esta metodología permite avanzar hacia el entendimiento de la complejidad de la dinámica regional asociada al ciclo hidrológico, definir los elementos e interrelaciones que componen el sistema, involucrar a la población en el diseño del modelo bajo el concepto de conocimiento experto, y se provee evidencia empírica de la capacidad de los autómatas celulares para simular fenómenos complejos.

El conjunto de resultados de esta investigación muestran al agua y el suelo como elementos articuladores y variables fundamentales que identifican a La Mojana. Por esta razón se recomienda concentrar esfuerzos en la sostenibilidad de los cuerpos de agua y sus ecosistemas asociados, en armonía con las actividades productivas de sus habitantes.

TRADUCCIÓN DEL RESUMEN AL INGLÉS:

The region of La Mojana is characterized by its complex hydrological system, a strong social and environmental imbalance, and frequent large-scale floods that affect the productive activities and limit the life quality for its inhabitants.

In an effort to contribute to the sustainability of this region, it has been design a conceptual model that would identify trends, evaluate management alternatives and develop alternative scenarios, seeking to preserve the ecosystem and improve the life quality without altering the identity of the system.

In a systemic focusing, it has been found the conceptual and methodological approaches for studying complex systems, as the region of La Mojana, characterized primarily by internal and external relationships between components, as such as soils, weather, biota, people's behaviors, and hydrological system.

We used several methodological tools that included participatory rural appraisal, polls, interviews, data mining and cellular automata to characterize the region, to identify variables' patterns and design a model that simulates the dynamics of land use from simple rules that relate these applications with the water regime and the dynamics of settlement.

This methodology is able to understand the complex regional dynamic associated with the hydrological cycle, to define the elements and interrelationships that compound the system, involving people in the design of the model under the concept of expertise, and gives empirical evidence of the ability of cellular automata to simulate complex phenomena.

The result set of this research shows the water resources and the land are fundamental variables articulating that identify La Mojana region. For this reason is recommendable to concentrate efforts on the sustainability of water bodies and associated ecosystems in harmony with productive activities of their inhabitants.

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL (MÁXIMO 5):

Autómata celular, geoestadística, gestión integral, sostenibilidad, Mojana.

TRADUCCIÓN AL INGLÉS DE LOS DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES:

Cellular automata, geostatistics, integral management, sustainability, Mojana.

FIRMA DEL DIRECTOR: _____ :

Nombre(S) completo(s) del(los) autor(es) y (Año de nacimiento):

Alejandro Franco Rojas. Fecha de nacimiento: mayo 05 de 1980.

*A la región de La Mojana y el San Jorge y sus habitantes,
quienes con suma generosidad me permitieron indagar en sus entrañas,
y quienes merecen una oportunidad para pensar en un mejor mañana
más digno, prospero y equitativo*

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a Nelson Obregón y Juan José Mariño por confiar en mis capacidades, en mis ideas y por guiarme en este proceso dándome la oportunidad de desarrollar mi iniciativa.

Agradezco a Corpomojana y a los funcionarios Orlando M. García, Adriana Arrieta, Robinsón Arrieta, Gustavo Solano y Kelly Campos quienes me acompañaron en mi travesía por la región y me brindaron su amistad. De igual forma agradezco a Miguel Ángel Vanegas y Ana Carolina Santos, una pareja hermosa de talentosos ingenieros, por su aporte al desarrollo del modelo de gestión.

A mi esposa Marcela, por inspirarme, por su apoyo incondicional, por sus horas de trabajo, ideas y palabras de aliento, y finalmente a mi pequeña hija quien me espero hasta el último momento para hacer de esta creación una doble Victoria.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	18
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	20
3. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	26
4. OBJETIVOS	27
4.1 Objetivo general	27
4.2 Objetivos específicos.....	27
5. METODOLOGÍA.....	28
5.1 DESCRIPCIÓN DEL ENFOQUE METODOLÓGICO.....	28
5.2 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	30
5.2.1 Información primaria.....	30
5.2.1.1 Encuestas	30
5.2.1.2 Talleres	33
5.2.1.3 Entrevistas con expertos.....	37
5.2.2 Información secundaria	38
5.2.2.1 Cartografía – IGAC	39
5.2.2.2 Cartografía temática - Corpomojana.....	39
5.2.2.3 Información hidrológica - IDEAM	40
5.2.2.4 Estadísticas demográficas (DANE, 2005)	42
5.2.2.5 Sistema de información agropecuaria (Umata 2000-2005).....	42
5.2.2.6 Censo Bovino (Fedegan 1999-2009).....	42
5.2.2.7 Censo Arrocerero (Fedearroz 2000-2007).....	42
5.2.2.8 Producción pesquera (Corpomojana)	42
5.3 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA	42
5.3.1 Modelo de elevación digital del terreno	43
5.3.2 Manchas de inundación diarias y probabilidad de inundación.....	44
5.3.2.1 Selección período de modelación.....	44
5.3.2.2 Correlación entre estaciones y estimación de datos faltantes	44
5.3.2.3 Construcción de series diarias de nivel	45
5.3.2.4 Validación de la metodología propuesta para construir las manchas de inundación...46	
5.3.2.5 Construcción de manchas de inundación.....	47
5.3.2.6 Cálculo probabilidad de inundación.....	50
5.3.3 Otras aproximaciones a la modelación hidrodinámica de La Mojana.....	52
5.4 MODELO AUTOMATA CELULAR	53
5.4.1 Formulación del Autómata Celular	53
5.4.2 Implementación del Autómata Celular.....	54
5.4.3 Verificación del Autómata Celular	55
5.4.4 Vecindad y nomenclatura del Autómata Celular	55
5.4.5 Reglas de cambio del Autómata Celular	57
5.4.6 Pronóstico del cambio en los usos del suelo	60
6. MARCO CONCEPTUAL	61
6.1 GESTION Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL TERRITORIAL	61
6.1.1 La cuenca como unidad de planeación y gestión ambiental.....	61
6.1.2 Gestión integral del recurso hídrico y ordenamiento ambiental territorial	61
6.1.3 Principios de la gestión y planeación de cuencas.....	61
6.1.4 Desarrollo normativo sobre ordenamiento de cuencas en Colombia	62
6.2 COMPLEJIDAD Y ENFOQUE SISTÉMICO.....	64
6.3 SOSTENIBILIDAD Y DESARROLLO SOSTENIBLE	65
6.4 HERRAMIENTAS DE PROSPECCIÓN	66
6.4.1 La construcción del futuro	66

6.4.2	Metodologías para el análisis prospectivo	68
6.4.2.1	Ábaco de Regnier	68
6.4.2.2	El método del Análisis Estructural	68
6.4.2.3	El método del Juego de Actores	69
6.4.2.4	Matriz del impacto cruzado	69
6.4.2.5	Método Delphi	69
6.4.2.6	La construcción de escenarios	69
6.4.2.7	Modelos de simulación	69
6.4.2.8	Comparación de métodos de prospección	69
6.5	GEOSIMULACIÓN Y AUTÓMATAS CELULARES (AC)	70
6.5.1	Definición de geosimulación	70
6.5.2	Autómatas Celulares	70
6.5.2.1	Concepto y características de los Autómatas Celulares (AC)	70
6.5.2.2	Antecedentes	72
6.5.2.3	Clasificación de Wolfram	73
6.5.2.4	Las condiciones de frontera de los AC	73
6.5.2.5	Reglas de transición de los AC	73
6.5.2.6	Calibración y validación	74
6.5.2.7	Evolución de AC en la geografía	75
6.5.3	Aplicaciones de Autómatas Celular en geosimulación y prospección	76
6.5.3.1	Crecimiento urbano de Dongguan (2000)	76
6.5.3.2	Crecimiento urbano de la ciudad de Amherst (1994)	77
6.5.3.3	Propagación de patrones urbanos – El modelo Sleuth (2002)	77
6.5.3.4	Modelo de crecimiento urbano de la ciudad de Shanghai, China (2009)	77
6.6	MINERIA DE DATOS Y GANANCIA DE INFORMACIÓN	79
7.	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y APORTES AL MODELO CONCEPTUAL	83
7.1	LA MOJANA, UN SISTEMA COMPLEJO	83
7.1.1	Ciclo hidrológico y sistemas de producción	83
7.1.1.1	Precipitación	83
7.1.1.2	Comportamiento del sistema hídrico	86
7.1.1.3	Relación entre precipitación y el comportamiento del sistema hídrico	91
7.1.1.4	Sincronía entre los sistemas productivos y el ciclo hidrológico	93
7.1.2	Población	100
7.1.3	Acceso a servicios públicos y calidad de vida	101
7.1.3.1	Agua para cocinar y para beber - Acueducto	101
7.1.3.2	Energía eléctrica	103
7.1.3.3	Manejo y disposición de residuos sólidos	103
7.1.3.4	Disposición de aguas residuales	104
7.1.3.5	Combustible utilizado para cocinar	105
7.1.4	Ocupación y actividades productivas	106
7.1.4.1	Economía mixta de subsistencia	106
7.1.4.2	Producción agrícola para autoconsumo	107
7.1.4.3	Producción agrícola con fines comerciales	109
7.1.4.4	Producción pecuaria	111
7.1.4.5	Nivel de organización	113
7.1.4.6	Dependencia de las actividades productivas al uso de zonas comunes	113
7.1.5	Marginalidad económica de los pequeños campesinos de la región	116
7.1.6	Tenencia de la tierra y estructura de propiedad	117
7.1.7	Las inundaciones y la respuesta de los pobladores	119
7.1.7.1	El sistema hídrico, un recurso de uso común	119
7.1.7.2	Los bosques, un recurso de uso común	123
7.1.7.3	Frecuencia de afectación por inundaciones	124
7.1.7.4	Respuesta ante una inundación	125
7.1.7.5	Percepción sobre la temporada de aguas altas en la región – Las crecientes	126
7.1.7.6	Percepción sobre la temporada de aguas bajas en la región – El verano	127

7.1.7.7	Actividades que afectan la dinámica natural de la región	129
7.1.7.8	Síntesis del análisis de respuesta de la población ante las inundaciones	133
7.2	CONCEPCIÓN DE BIENESTAR.....	134
7.2.1	Identidad, arraigo y expectativas de la población	139
7.3	PROBLEMÁTICA AMBIENTAL – CONFLICTOS, LIMITACIONES Y POTENCIALIDADES DE LA REGIÓN	142
7.3.1.1	Acercamiento histórico a la problemática	142
7.4	LINEA BASE.....	143
7.4.1	División político - administrativa	143
7.4.2	Centros poblados y puntos de referencia.....	144
7.4.3	Suelos.....	144
7.4.4	Usos del suelo	148
7.4.5	Aptitud de los suelos.....	151
7.4.6	Conflictos de uso agropecuario de los suelos.....	152
7.4.7	Erosión.....	153
7.4.8	Capacidad de uso agropecuario.....	155
7.4.9	Red de drenaje	156
7.4.10	Ciénagas.....	157
7.4.11	Espejo de aguas bajas	158
7.4.12	Red vial.....	159
7.4.13	Viviendas	160
7.4.14	Densidad de población	161
7.5	MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DEL TERRENO	164
7.6	HIDRODINÁMICA Y PROBABILIDAD DE INUNDACIÓN EN LA MOJANA.....	165
7.6.1	Descripción del sistema físico	165
7.6.1.1	Procesos hidrológicos.....	166
7.6.1.2	Síntesis fisiografía, geomorfología y dinámica fluvial de la cuenca del Río San Jorge	167
7.6.2	Aportes de la modelación hidrodinámica	169
7.6.3	Periodo de modelación.....	173
7.6.4	Validación de la metodología propuesta	173
7.6.5	Construcción de series diarias de nivel	176
7.6.5.1	Correlación entre estaciones y estimación de datos faltantes	176
7.6.5.2	Series diarias de nivel.....	180
7.6.6	Construcción de manchas de inundación	183
7.6.7	Probabilidad de inundación	185
8.	DISEÑO DEL MODELO CONCEPTUAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA Y LOS USOS DEL SUELO	189
8.1	CARACTERIZACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.....	189
8.2	EL DEBER SER DEL MODELO.....	189
8.3	MODELO CONCEPTUAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA Y LOS USOS DEL SUELO	190
8.3.1	Descripción	190
8.3.2	Alcances y aportes	191
8.3.3	Limitaciones.....	192
8.4	AUTÓMATA CELULAR: RIESGO DE INUNDACIÓN Y DINÁMICA DE USOS DEL SUELO	193
8.4.1	Implementación del modelo A.C.....	193
8.4.2	Resultados del modelo A.C.	196
8.4.2.1	Estadística de las reglas de cambio del modelo A.C.....	196
8.4.2.2	Verificación de Autómata Celular con pronóstico de usos del suelo al año 2001	198
8.4.2.3	Estimación del error en el pronóstico de usos del suelo	198
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	200
10.	BIBLIOGRAFÍA	203

LISTA DE CUADROS

Tabla No 2-1. Evaluación de afectación por inundaciones en La Mojana en el año 2005.....	22
Tabla No 2-2. Inversiones para la región de La Mojana 2006 – Estrategias a corto plazo	23
Tabla No 2-3. Vigencias futuras y obras de infraestructura propuestas para La Mojana en el marco del Programa de desarrollo sostenible de la región de La Mojana	24
Tabla No 5-1. Talleres desarrollados con la comunidad.....	33
Tabla No 5-2. Cartografía IGAC utilizada en la investigación.....	39
Tabla No 5-3. Estaciones LG y LM utilizadas en la investigación	41
Tabla No 5-4. Niveles medios multianuales para las 13 estaciones hidrológicas	44
Tabla No 5-5. Modificación nivel de referencia de las estaciones hidrológicas.....	47
Tabla No 5-6. Construcción curva de duración de niveles Enero a Abril (1994 – 1996).....	51
Tabla No 5-7. Tabla de equivalencias para reclasificación de categorías del AC.....	56
Tabla No 6-1. Evolución normativa y enfoques en el manejo de cuencas en Colombia.....	62
Tabla No 6-2. Puntos de vista sobre el desarrollo sostenible.....	65
Tabla No 6-3. Regla de transición para un autómata celular (2,1) expresada en notación binaria..	74
Tabla No 7-1. Precipitación en la región según análisis estacional.....	83
Tabla No 7-2. Reescalamiento de precipitación media - IDEAM.....	84
Tabla No 7-3. Variación mensual de niveles de agua según análisis estacional	88
Tabla No 7-4. Calendario agrícola en La Mojana y el San Jorge según análisis estacional.....	98
Tabla No 7-5. Tamaño de las familias en La Mojana y el San Jorge	100
Tabla No 7-6. Agua utilizada ara cocinar y beber.....	102
Tabla No 7-7. Fuente u origen del servicio de energía eléctrica	103
Tabla No 7-8. Manejo y disposición de residuos sólidos	103
Tabla No 7-9. Disposición de aguas residuales.....	104
Tabla No 7-10. Combustible utilizado para cocinar	105
Tabla No 7-11. Cobertura de servicios públicos en La Mojana	105
Tabla No 7-12. Mortalidad infantil (tasa x 1.000 nacidos vivos) en La Mojana	105
Tabla No 7-13. Pobreza y NBI en La Mojana (1993).....	105
Tabla No 7-14. Principales actividades productivas en La Mojana y el San Jorge	106
Tabla No 7-15. Personas dedicadas a una sola actividad económica en La Monaja y el San Jorge	106
Tabla No 7-16. Personas que practican la agricultura de autoconsumo como complemento de su actividad principal.....	107
Tabla No 7-17. Productos sembrados para autoconsumo en La Monaja y el San Jorge	108
Tabla No 7-18. Personas que practican la agricultura con fines comerciales como complemento a su actividad productiva principal	109

Tabla No 7-19. Productos sembrados con fines comerciales en La Mojana y el San Jorge.....	109
Tabla No 7-20. Matriz cualitativa arroz seco mecanizado en La Mojana y el San Jorge	110
Tabla No 7-21. Matriz cualitativa arroz seco manual en La Mojana y el San Jorge.....	110
Tabla No 7-22. Matriz cualitativa de los principales productos agrícolas - 2005.....	111
Tabla No 7-23. Personas que practican la producción pecuaria de autoconsumo como complemento de su actividad productiva principal	112
Tabla No 7-24. Producción pecuaria de autoconsumo en La Mojana y el San Jorge.....	112
Tabla No 7-25. Personas que practican la producción pecuaria con fines comerciales como complemento de su actividad productiva principal	112
Tabla No 7-26. Zonas reconocidas como de uso común en La Mojana y el San Jorge	114
Tabla No 7-27. Uso que dan los pobladores de La Mojana y el San Jorge a las zonas comunes	114
Tabla No 7-28. Dependencia total o parcial de las actividades económicas al uso de zonas comunes.....	115
Tabla No 7-29. Que representan las ciénagas, caños y ríos para la población	120
Tabla No 7-30. Tabla de patrones. El recurso hídrico como sustento familiar o como fuente de comida.....	121
Tabla No 7-31. Tabla de patrones. Percepción positiva sobre el recurso hídrico	122
Tabla No 7-32. Que representan para la población los bosques de la región.....	123
Tabla No 7-33. Frecuencia de afectación por inundaciones.....	124
Tabla No 7-34. Respuesta ante una inundación.....	125
Tabla No 7-35. Que representan la época de crecientes para la población.....	126
Tabla No 7-36. Percepción negativa sobre la época de crecientes en La Mojana y el San Jorge	127
Tabla No 7-37. Que representan la época de verano para la población	127
Tabla No 7-38. Percepción positiva sobre la época de aguas bajas – El verano.....	128
Tabla No 7-39. Participación en actividades antropicas que afectan la dinámica natural de la región	129
Tabla No 7-40. Adecuación de suelo inundable según actividad productiva	130
Tabla No 7-41. Adecuación de suelo inundable y frecuencia de inundación	130
Tabla No 7-42. Frecuencia con que se participa en encauzamiento de ríos y caños	131
Tabla No 7-43. Encauzamiento de ríos y caños según frecuencia de inundación y tiempo en la región	131
Tabla No 7-44. Frecuencia con que se participa en la construcción de diques	132
Tabla No 7-45. Construcción de diques según actividad productiva	132
Tabla No 7-46. Construcción de diques según región y frecuencia con que se inunda.....	132
Tabla No 7-47. Población que realiza tala de árboles	133
Tabla No 7-48. Correlación entre variables (%).....	135
Tabla No 7-49. Bienestar para la población de La Mojana y el San Jorge.....	136
Tabla No 7-50. Prioridades para la población de La Mojana y el San Jorge.....	137

Tabla No 7-51. ¿Qué le gustaría cambiar de la región donde vive?	141
Tabla No 7-52. ¿Qué le gustaría que nunca cambie en la región donde vive?	141
Tabla No 7-53. Usos el suelo 1987 vs 2001	149
Tabla No 7-54. Evolución de los usos del suelo entre 1987 y 2001 (%)	151
Tabla No 7-55. Reclasificación densidad de población	163
Tabla No 7-56. Cálculo de la pendiente de Taylor - Río San Jorge	167
Tabla No 7-57. Reclasificación para definir categorías de inundación Enero a Abril.....	186
Tabla No 7-58. Reclasificación para definir categorías de inundación Mayo - Agosto.....	187
Tabla No 7-59. Reclasificación para definir categorías de inundación Septiembre - Diciembre....	188
Tabla No 8-1. Patrones más repetidos para cambio de usos del suelo 1987 - 2001	196
Tabla No 8-2. Reglas más utilizadas por el Autómata Celular para realizar el pronóstico de los usos del suelo 2001	197
Tabla No 8-3. Reglas No 158. Regla más usada en el pronóstico usos del suelo 2001.....	197

LISTA DE FIGURAS

Figura No 2.1. Integración de las variables del Modelo de Potencialidades del Suelo	21
Figura No 2.2. Comparación entre erosión real y simulada en la cuenca del río Chachafruto utilizando el Modelo de Potencialidades del Suelo.....	22
Figura No 2.3. Proyecto dique marginal del Río Cauca.....	23
No 5.1. Metodología de la investigación	30
Figura No 5.2. Mapa de distribución espacial de las encuestas.....	31
Figura No 5.3. Distribución porcentual de encuestas según sitio de residencia (%).....	32
Figura No 5.4. Distribución por edad de los encuestados	32
Figura No 5.5. Tiempo en la región de los encuestados	33
Figura No 5.6. Análisis estacional – Palo Alto	35
Figura No 5.7. Gráfico histórico – Palo Alto	35
Figura No 5.8. Localización de las estaciones hidrológicas	41
Figura No 5.9. Construcción Modelo de Elevación Digital – Mojana.....	43
Figura No 5.10. Construcción lámina de agua y ajuste de puntos de referencia	45
Figura No 5.11. Validación procedimiento de generación de manchas de inundación	46
Figura No 5.12. Suma de niveles medios diarios en cada celda.....	48
Figura No 5.13. Manchas de inundación Enero - Abril (1994 a 1996).....	49
Figura No 5.14. Cálculo probabilidad de inundación de cada celda.....	50
Figura No 5.15. Curva de duración de niveles Enero a Abril (1994 - 1996)	51
Figura No 5.16. Distribución de probabilidad de inundación Enero a Abril (1994 – 1996).....	52
Figura No 5.17. Variables incorporadas al Autómata Celular.....	53
Figura No 5.18. Área implementación del Autómata Celular.....	54
Figura No 5.19. Vecindad bidimensional tipo Moore utilizada en el Autómata Celular	55
Figura No 5.20. Nomenclatura de la vecindad tipo Moore para cada variable	56
Figura No 5.21. Construcción de la tabla de patrones con la vecindad Moore	58
Figura No 5.22. Reporte Weka – Árbol de decisión.....	58
Figura No 5.23. Ejemplo de árbol de decisión – Autómata Celular Usos del Suelo.....	59
Figura No 5.24. Pronóstico del cambio en el uso del suelo.....	60
Figura No 6.1. Dimensiones fundamentales de la relación sociedad - naturaleza.....	64
Figura No 6.2. Futuro único y verdadero: El futuro es parecido al pasado.	66
Figura No 6.3. Futuro múltiple: El futuro puede ser diferente	67
Figura No 6.4. El futuro múltiple e incierto	67
Figura No 6.5. El futuro no determinado	68
Figura No 6.6. Configuración de un Autómata Celular bidimensional	71
Figura No 6.7. Vecindades típicas de un Autómata Celular bidimensional	71

Figura No 6.8. Vecindades de un Autómata Celular bidimensional.....	75
Figura No 6.9. Mapas de urbanización de Dongguan 1988 y 1993.....	76
Figura No 6.10. Estructura del sistema integrado del modelo A.C.	78
Figura No 6.11. Proyecciones de la dinámica del suelo urbano en Shanghai al año 2020	79
Figura No 6.12. Proceso del descubrimiento del conocimiento de bases de datos (KDD)	80
Figura No 6.13. Conjunto de patrones para determinar el caudal de escorrentía en función de variables topográficas e hidrológicas.....	81
Figura No 6.14. Árbol de decisión que determina el caudal de escorrentía en función de variables topográficas e hidrológicas	81
Figura No 7.1. Histograma de precipitación media mensual característico de La Mojana.....	84
Figura No 7.2. Comparación registros de precipitación del IDEAM y Análisis Estacional.....	84
Figura No 7.3. Precipitación media mensual en la región del Bajo San Jorge.....	85
Figura No 7.4. El veranillo de San Juan en la región del Bajo San Jorge	86
Figura No 7.5. Precipitación media mensual en la región de La Mojana	86
Figura No 7.6. Localización y tamaño de los ecosistemas asociados a los cuerpos de agua en La Mojana	87
Figura No 7.7. Variación nivel medio de agua en la región del Bajo San Jorge - Sistemas asociados al río San Jorge.....	88
Figura No 7.8. Variación nivel medio de agua en la región del Bajo San Jorge - Sistemas asociados a las ciénagas	89
Figura No 7.9. Variación nivel medio de agua en la región del Bajo San Jorge - Sistemas asociados al río Magdalena	89
Figura No 7.10. Variación nivel medio de agua en la región de La Mojana	89
Figura No 7.11. Variación mensual de caudales en ríos Cauca y Magdalena	90
Figura No 7.12. Precipitación vs nivel de agua en Santiago Apóstol, Cispataca y Villa Nueva – Bajo San Jorge.....	91
Figura No 7.13. Precipitación vs nivel de agua en El Mamón – Bajo San Jorge.....	91
Figura No 7.14. Precipitación vs nivel de agua en Nueva Fe – Bajo San Jorge	92
Figura No 7.15. Precipitación vs nivel de agua en La Mojana y el río Cauca	92
Figura No 7.16. Pesca vs nivel de agua en Mamarraya - Río Cauca.....	95
Figura No 7.17. Pesca vs nivel de agua en Belén - Río San Jorge.....	95
Figura No 7.18. Pesca vs nivel en Palo Alto - Ciénagas	96
Figura No 7.19. Pesca vs nivel de agua en Orejero y Palmarito - Mojana	96
Figura No 7.20. Dinámica del hato ganadero en La Monaja y el San Jorge	97
Figura No 7.21. Períodos de siembra y cosecha en La Monaja y el San Jorge.....	98
Figura No 7.22. Segmentación del ciclo productivo en La Mojana y el San Jorge.....	99
Figura No 7.23. Distribución por edad de la población en La Mojana y el San Jorge.....	101

Figura No 7.24. Actividades productivas con fines comerciales y de autoconsumo en La Mojana y el San Jorge	106
Figura No 7.25. Intensidad en el uso de zonas comunes con fines productivos en La Mojana y el San Jorge.....	115
Figura No 7.26. Ingreso promedio diario por actividad económica en La Mojana y el San Jorge .	116
Figura No 7.27. Saldo promedio por actividad económica en La Mojana y el San Jorge	117
Figura No 7.28. Relación de tenencia de la tierra en La Mojana y el San Jorge.....	118
Figura No 7.29. Distribución por tamaño de predios rurales en La Mojana y el San Jorge (ha)....	118
Figura No 7.30. Bienestar para la población de La Mojana y el San Jorge.....	134
Figura No 7.31. Acercamiento histórico a la problemática ambiental en La Mojana.....	142
Figura No 7.32. División Político – Administrativa	145
Figura No 7.33. Centros poblados y puntos de referencia	146
Figura No 7.34. Mapa de Suelos.....	147
Figura No 7.35. Usos del suelo 1987	149
Figura No 7.36. Usos del suelo 2001	150
Figura No 7.37. Aptitud de los suelos	152
Figura No 7.38. Conflictos de uso agropecuario de los suelos.....	153
Figura No 7.39. Procesos denudativos	154
Figura No 7.40. Capacidad de uso agropecuario	155
Figura No 7.41. Red de drenaje y subcuencas.....	156
Figura No 7.42. Mapa de ciénagas	157
Figura No 7.43. Espejo de agua bajas – Marzo de 2001.....	158
Figura No 7.44. Red vial.....	159
Figura No 7.45. Viviendas	160
Figura No 7.46. Distribución lineal de las viviendas a lo largo de vías y ríos	161
Figura No 7.47. Densidad de casas	161
Figura No 7.48. Buffer múltiple alrededor de vías y ríos.....	162
Figura No 7.49. Rasterización del mapa de buffer.....	163
Figura No 7.50. Mapa densidad de población	164
Figura No 7.51. Modelo de Elevación Digital del terreno natural – DEM.....	165
Figura No 7.52. Esquema conceptual del sistema hídrico de La Mojana.....	167
Figura No 7.53. Perfil longitudinal del río San Jorge	167
Figura No 7.54. Subcuencas – Cuenca del Río San Jorge	168
Figura No 7.55. Dinámica fluvial del río San Jorge. Composición fotografías aéreas 23701 a 23694 – Vuelo M-1220 – Sobre 1429 (Agosto de 1962)	169
Figura No 7.56. Configuración ciénagas – río con HEC - RAS	170
Figura No 7.57. Geometría de cauce en River 2D: Red triangular irregular.....	170
Figura No 7.58. Esquema de configuración hidrológica del modelo de tanques.....	170

Figura No 7.59. Esquema de Mike She	172
Figura No 7.60. Esquema de modelo de balance hídrico de la región de La Mojana	172
Figura No 7.61. Comparación celda a celda del espejo de agua del mes de marzo	174
Figura No 7.62. Comparación de las manchas de inundación con imágenes satelitales.....	175
Figura No 7.63. Niveles medios diarios estación San Antonio (Río San Jorge) – Marzo 1994. Correlación entre niveles medidos y niveles generados con datos de estaciones vecinas....	177
Figura No 7.64. Niveles medios diarios estación Majagual (Caño Mojana) – Septiembre 1994. Correlación entre niveles medidos y niveles generados con datos de estaciones vecinas....	177
Figura No 7.65. Niveles medios diarios estación Magangué - Esperanza (río Magdalena) Abril 1995. Correlación entre niveles medidos y niveles generados con datos de estaciones vecinas	178
Figura No 7.66. Niveles medios diarios estación Galindo (río Cauca) Mayo 1982. Correlación entre niveles medidos y niveles generados con datos de estaciones vecinas.....	178
Figura No 7.67. Niveles medios diarios estación Orejero (caño Panceguita) Mayo 1994. Correlación entre niveles medidos y niveles generados con datos de estaciones vecinas.....	179
Figura No 7.68. Niveles medios diarios estación Armenia (río Magdalena) Abril 1995. Correlación entre niveles medidos y niveles generados con datos de estaciones vecinas.....	179
Figura No 7.69. Series de niveles medios diarios – Río San Jorge.....	180
Figura No 7.70. Series de niveles medios diarios – Ciénagas asociadas al río San Jorge	180
Figura No 7.71. Series de niveles medios diarios – Río Magdalena	181
Figura No 7.72. Series de niveles medios diarios – Río Cauca.....	182
Figura No 7.73. Series de niveles medios diarios – Caños Mojana y Panceguita	182
Figura No 7.74. Manchas de inundación Enero - Abril (1994 a 1996).....	184
Figura No 7.75. Mancha de inundación Mayo - Agosto (1994 a 1996)	184
Figura No 7.76. Manchas de inundación Septiembre - Diciembre (1994 a 1996).....	185
Figura No 7.77. Mapa de probabilidad de inundación Enero - Abril	186
Figura No 7.78. Mapa de probabilidad de inundación Mayo - Agosto	187
Figura No 7.79. Mapa de probabilidad de inundación Septiembre - Diciembre	188
Figura No 8.1. El deber ser del modelo conceptual	190
Figura No 8.2. El modelo conceptual para la gestión integral del agua y los usos del suelo en La Mojana	191
Figura No 8.3. Mapas de entrada al Automata Celular para área de 52.600 x 52.900 m	193
Figura No 8.4. Mapas de entrada al Automata Celular para área de 3.500 x 3.000 m m	194
Figura No 8.5. Pronóstico Usos del Suelo 2001	198
Figura No 8.6. Error en el pronóstico del Automata Celular para Usos del Suelo 2001.....	199

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Formato de encuestas

Anexo 2. Listado participantes en los talleres

Anexo 3. Formato talleres herramientas de DRP

Anexo 4. Registro fotográfico de los resultados de los talleres

Anexo 5. Matriz para sistematización de entrevistas

Anexo 6. Códigos Mat Lab – Autómata Celular

1. INTRODUCCIÓN

La Mojana es una región localizada en la costa Caribe colombiana, conformada por 11 municipios pertenecientes a los departamentos de Bolívar, Sucre, Córdoba y Antioquia, constituye un complejo sistema hídrico del cual hacen parte los ríos San Jorge, Cauca, el brazo de Loba del río Magdalena, y un sin número de caños y ciénagas.

En la época prehispánica, esta región fue habitada por los indígenas Zenúes, quienes realizaron la modificación morfológica más grande hasta ahora conocida en las ciénagas mediante la construcción de canales artificiales, construyeron un sistema hidráulico de 500.000 ha, el cual les permitió una alta densidad de población, el desarrollo de la agricultura intensiva y el control de inundaciones, razón por la cual se les reconoce como “La sociedad hidráulica Zenú” (Plazas, et al, 1993).

Posteriormente, con la conquista se introdujo la ganadería, actividad que se consolidaría como el principal renglón económico de la región, con lo cual, cambió la visión de este territorio y particularmente de su sistema hídrico. A partir de ese momento, lo importante no era articular el sistema social y económico al manejo del agua, sino impedir la entrada del agua a los terrenos donde se encontraba pastando el ganado (Ortiz, 2005), para lo cual se desecaron ciénagas y se taponaron cientos de caños. Con la ganadería se forjó la concentración en la tenencia de la tierra y el deterioro de los recursos naturales, presionando a los pequeños campesinos a ocupar zonas bajas en las rondas de los ríos y caños, siendo más vulnerables ante las inundaciones. Este cambio en la ocupación y uso del suelo alcanzó una dimensión tan grande, de manera que en las últimas décadas, las inundaciones periódicas se han hecho más importantes, tanto por su magnitud como por su impacto socio-económico.

Hoy, la problemática entorno al recurso agua en la Mojana, se ve acrecentada por el conflicto armado, la pobreza, la marginalidad geográfica y la fuerte división político-administrativa, lo cual ha llevado a la construcción de una visión fragmentada del territorio, perdiendo de vista su función principal que es la regulación hidrológica.

Esta problemática ha sido abordada en diferentes estudios, algunos ejecutados en el marco del Programa de Desarrollo Sostenible para la región de la Mojana por la FAO y el DNP entre el 2002 y el 2003.; la investigación del Departamento de Desarrollo Rural y Regional de la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales de la Pontificia Universidad Javeriana sobre el conflicto ambiental en La Mojana; las investigaciones antropológicas de Clemencia Plazas y Ana María Falchetti sobre la sociedad hidráulica Zenú; y los estudios de consultoría contratados por la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge –CVS- para elaborar el diagnóstico detallado del sistema hídrico y el análisis ambiental de la dinámica de la red de drenaje y cuerpos de agua..

Al comparar los diversos informes y diagnósticos realizados hasta el momento, con la realidad que se vive en la región y que resulta inocultable durante cada periodo invernal, se puede inferir que a pesar de los inmensos esfuerzos realizados por transformar la realidad de La Mojana aún no se alcanza una solución, en parte por la carencia de una metodología que permita abordar la problemática de manera integral y prospectivamente.

Al reconocer la evolución histórica del manejo del agua en La Mojana, así como la estrecha relación del hombre y los distintos componentes del territorio con el sistema hidráulico, se puede concluir que la formulación de una solución a las continuas inundaciones en La Mojana, no puede dejar de lado los problemas relacionados con el uso del suelo, las actividades antrópicas y la preservación del medio ambiente. En este sentido, más que un modelo hidráulico, se requiere un

modelo de gestión del agua y de los usos del suelo que contribuya a la evaluación de alternativas y a la toma de decisiones.

El modelo de gestión, debe ser adecuado y coherente ambiental, hidráulica y socialmente, lo cual significa que busque la regulación hidráulica e hidrológica y *“garantice en tiempo y espacio, por un lado, la dotación de recursos naturales y de servicios ambientales y, por otro, que las actividades humanas sean realizadas en armonía con las leyes de los sistemas naturales de tal manera que se preserve la integridad de los procesos que rigen los flujos de energía, materia y biodiversidad de los ecosistemas”* (Gallopín, 2003).

Adicionalmente, para que tenga una aplicación real y concreta, la búsqueda de soluciones debe ocurrir en colaboración cercana con los actores y los grupos sociales involucrados, permitiendo el uso del conocimiento y la capacidad por fuera del campo de la ciencia¹.

En síntesis, La Mojana debe ser entendida como un sistema complejo, reconociendo la naturaleza espacial y dinámica de los fenómenos y actores involucrados. Para lograr este objetivo, en esta investigación se pretende la construcción de un modelo de gestión que involucre la dinámica del sistema hídrico, así como su interrelación con factores ambientales, sociales y de usos del suelo. Este modelo, en acople con los Sistemas de Información Geográfica², utilizará herramientas como los Autómatas Celulares³ para simular a La Mojana como un sistema complejo, con aportes de pobladores de la región e instituciones que se encuentran en la región.

Los Autómatas Celulares ofrecen la posibilidad de representar de forma discreta y dinámica, el comportamiento complejo de un sistema hidráulico y socio-económico como el de La Mojana a partir de reglas de transición y condiciones iniciales sencillas basadas en relaciones de vecindad.

¹ Alzate Atehortúa, Beatriz E. Indicadores de sostenibilidad ambiental de tercera generación en la gestión ambiental sistémica. Caso Páramo de Guerrero, Cundinamarca. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2006. Cita a Cassel-Gintz M., 2003 en Requerimientos de la investigación sobre desarrollo sostenible.

² En adelante, Sistemas de Información Geográfica se denominará SIG.

³ En adelante, Autómatas Celulares se denominará AC.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En Colombia, el concepto de ordenamiento ambiental del territorio ha ido evolucionando hasta llegar a ser considerado como componente indispensable del ordenamiento territorial, entendiendo el ordenamiento como un proceso en el cual el agua constituye el primer recurso natural objeto de planificación.

Como punto de partida, la Constitución Política de 1991, le adjudica al territorio una función ecológica y condiciona las actividades productivas al mantenimiento de los procesos naturales base de la sustentabilidad del desarrollo. De igual manera el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010 “Estado comunitario: desarrollo para todos”, reconoce la necesidad de articular las dimensiones económica, social y ambiental del desarrollo de una manera sostenible, desde un enfoque regional, con la gestión integral del agua como elemento principal (DNP, 2006).

De manera más concreta, el Decreto 1729 de 2002 “Guía técnico científica para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia” (IDEAM, 2004), define claramente la cuenca como unidad de planeación y gestión ambiental, y presenta las etapas del proceso de planificación y manejo de cuencas, pero no define claramente el sistema de selección y valoración de las alternativas.

En la práctica, los planes de gestión de nuestras cuencas son realizados por las Corporaciones Autónomas Regionales, y comprenden el diagnóstico del estado actual de los recursos (generalmente mediante matrices de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas, y conceptos descriptivos de profesionales por especialidad), la identificación de conflictos, y la planeación por parte de expertos (por áreas o especialidades), a fin de dar respuesta a la problemática identificada (Corpoguavio, 2002). No obstante, se evidencia que no hay una herramienta o mecanismo claro para la prospección y valoración de alternativas que articule las diversas dimensiones del desarrollo (componentes del sistema), y garantice la participación efectiva de la comunidad en la determinación del modelo de territorio que desea la comunidad.

Una característica fundamental de las cuencas y los sistemas hidrológicos, es que constituyen un área donde el agua con los sistemas físico y biótico, formados por los usos y usuarios de la cuenca, interdependen e interactúan en un proceso permanente y dinámico, por lo cual, constituyen sistemas abiertos, cuyo comportamiento complejo no se puede interpretar solo a base de estudios sobre el comportamiento de sus partes (IDEAM, 2004), tal como sería el caso de un simple modelo hidráulico.

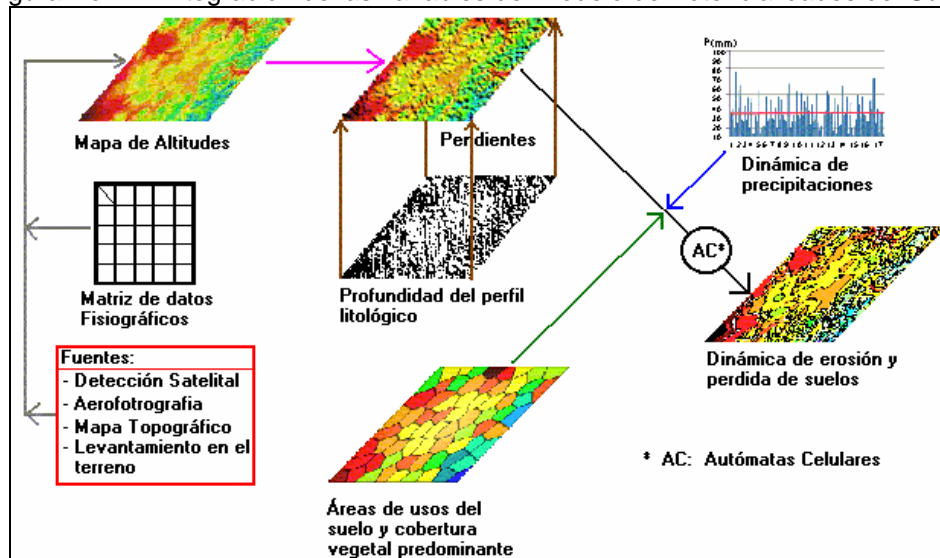
Es decir, la selección de una alternativa de manejo de una cuenca o de un sistema hidrológico, debe ser el resultado de la valoración y prospección del impacto sobre los otros componentes del sistema. Por lo cual, resulta justificable la elaboración de un modelo de prospección de escenarios que represente la dinámica espacio-temporal de la cuenca como un sistema complejo.

Aunque en la evaluación de escenarios tradicionalmente se han utilizado distintas técnicas de prospección como el método de análisis estructural, el método MAC-TOR, el método DELPHI y los árboles de decisión, investigaciones recientes sobre ingeniería de procesos complejos han aportado nuevas herramientas de soporte como los Automatas Celulares, la cual ha sido implementada exitosamente en el contexto colombiano (Quintero, et al, 2004). En esta primera investigación, se explorará el desempeño de los AC como herramienta de prospección en problemas de dinámica espacial y temporal, constituyendo un punto de partida para que en futuras investigaciones se realicen ejercicios de comparación con distintos métodos.

En Colombia, los profesores Luís A. Quintero⁴ e Isaac Dyner R⁵. realizaron un Modelo de Caracterización de la Dinámica de Potencialidades del Suelo, integrando autómatas celulares y dinámica de sistemas. Este modelo permite representar la evolución de los flujos de suelo y su incidencia en la sostenibilidad de la riqueza biótica (Quintero, et al, 2004).

El punto de partida de los profesores Quintero y Dyner, es la fuerte interrelación existente entre la erosión, la sostenibilidad de las poblaciones, el desarrollo socioeconómico, y el movimiento del agua en el suelo, planteando la necesidad de utilizar un enfoque integral que recoja otro tipo de análisis, hasta llegar al reordenamiento de la cuenca en términos de su sostenibilidad, para lo cual utilizan Autómatas Celulares y Sistemas de Información Geográfica en la formulación del modelo. Las variables de control involucradas en el modelo fueron la erosividad de la lluvia (frecuencia e intensidad de la precipitación), la cobertura vegetal y usos del suelo, la topografía (pendiente y distancia vertical), la red hídrica de la cuenca, y la profundidad efectiva del suelo. El modelo simula el proceso de erosión a partir de la interacción de los diferentes factores en dos etapas: la primera, la separación de partículas del suelo; y la segunda, el transporte o remoción de partículas por escorrentía. Asignando un escalas para cada unidad de análisis (célula o celda) y utilizando Autómatas Celulares se integran las tres variables mostradas en la Figura 2.1, y se evalúan los movimientos o direcciones del flujo.

Figura No 2.1. Integración de las variables del Modelo de Potencialidades del Suelo



Fuente: (Quintero, et al, 2004)

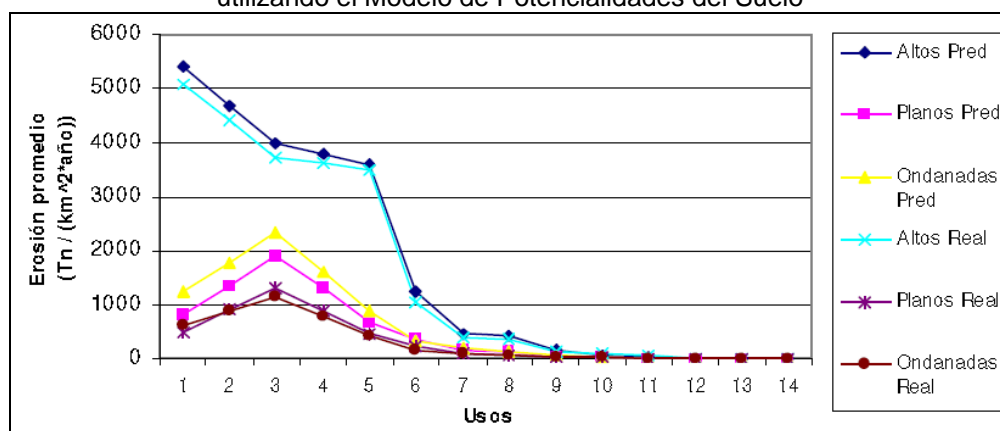
Posteriormente, mediante el factor de pérdida de suelo por erosión, se comunica el modelo de Potencialidades del Suelo con el modelo de Evolución Ecosistémica o modelo de dinámica de sistemas de evolución de la biomasa, el cual asocia la pérdida de suelo a uno de 100 subsistemas establecidos, llevando a unas 3.700 variables en cada tiempo de simulación.

Este modelo fue implementado en la cuenca del río Chachafruto (Ríonegro – Antioquia), obteniendo una buena correlación entre la erosión real y las predicciones simuladas, utilizando el modelo de potencialidades del suelo (ver Figura 2.2).

⁴ Ph.D. Luis Antonio Quintero Ortiz. Escuela de Ciencias y Humanidades. Universidad EAFIT.

⁵ Ph.D. Isaac Dyner Rezonzew. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Figura No 2.2. Comparación entre erosión real y simulada en la cuenca del río Chachafruto utilizando el Modelo de Potencialidades del Suelo



Fuente: (Quintero, et al, 2004)

Hasta aquí, se ha mostrado la necesidad, utilidad y posibilidad de modelar la complejidad de una cuenca en el contexto colombiano con una herramienta de prospección de escenarios que sirva como soporte a la toma de decisiones, pero no se ha discutido la necesidad o conveniencia de modelar el sistema hidráulico de La Mojana en estos términos. Por lo cual aunque las inundaciones en La Mojana no cesan año tras año, con el objeto de dimensionar el impacto de la problemática en la región, a continuación se presenta una breve reseña del impacto ocasionado por las temporadas invernales del último trimestre del año 2005 y del año 2007.

En el año 2005, el río Cauca se desbordó debido al rompimiento del terraplén en el sitio conocido como La Mejicana, en San Jacinto del Cauca, en el departamento de Bolívar, afectando los municipios de Guaranda, Majagual, San Benito Abad, San Marcos, Caimito, Sucre, Ayapel, Achí, San Jacinto del Cauca, Magangué y Nenchí.

Según los comités locales para la Prevención y Atención de Desastres (Documento CONPES 3421 - DNP, 2006), se identificaron 71.937 personas y 46.000 ha de cultivos afectados. La afectación por cada departamento se muestra en la Tabla 2-1.

Tabla No 2-1. Evaluación de afectación por inundaciones en La Mojana en el año 2005

Departamento	Personas	Familias	Viviendas destruidas	Viviendas averiadas	Hectáreas
Sucre	39.465	7.893	0	3.973	6.000
Bolivar	22.850	4.570	270	404	0
Cordoba	9.495	1.899	0	751	40.000
Antioquia	127	29	0	0	0
Total	71.937	14.391	270	5.128	46.000

Fuente: Documento Conpes 3421, -DNP, 2006 cita a DGPAD, Marzo 2006.

Como respuesta a las pérdidas y daños ocasionados por estas inundaciones, el gobierno nacional y local, en el marco del Programa de Desarrollo Sostenible de la Región de La Mojana (DNP - FAO, 2003), emprendieron una importante inversión con el objeto de atender la emergencia y controlar futuras inundaciones en La Mojana. Entre los años 2006 y 2009 la inversión proyectada alcanza los 192.138 millones de pesos, de los cuales 64.818 corresponden a las estrategias a corto plazo, tal como se muestra en la Tabla 2-2.

Tabla No 2-2. Inversiones para la región de La Mojana 2006 – Estrategias a corto plazo

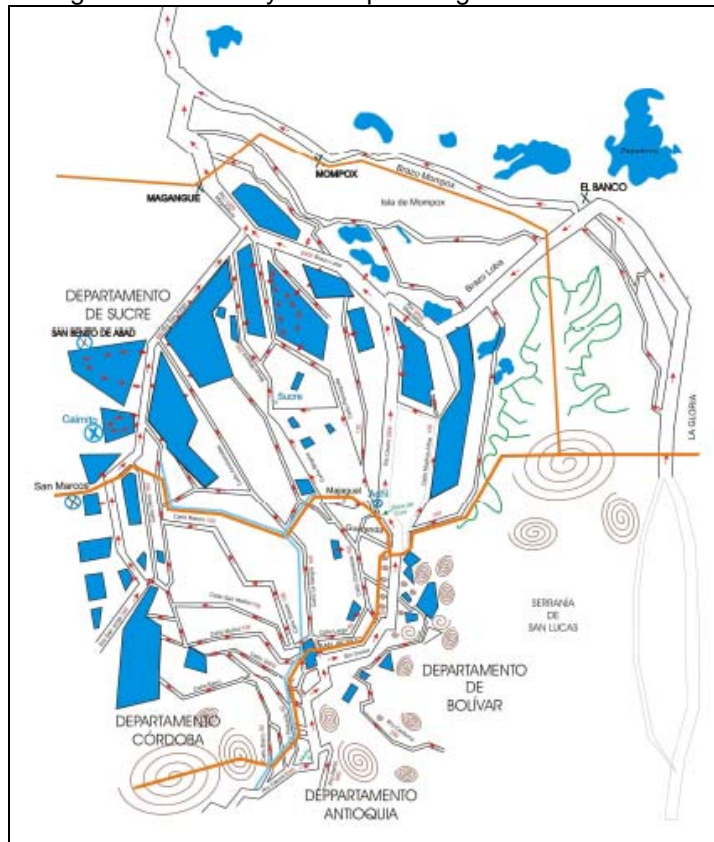
Item	Descripción	Inversión 2006
		(millones de pesos)
1	Plan de emergencia: atención a inundaciones	5,328
2	Prevención y atención de desastres	720
3	Desarrollo agropecuario	2,185
4	Desarrollo social	13,489
5	Vivienda rural	3,672
6	Vivienda urbana y ordenamiento territorial	5,690
7	Atención a población vulnerable	13,723
8	Proyectos de formación técnica profesional	1,363
9	Infraestructura (Dique y compuertas para control de inundaciones)	13,680
10	Ordenamiento ambiental y manejo de recursos naturales	4,968
	TOTAL	64,818

Fuente: Documento Conpes 3421, DNP, 2006.

Al respecto cabe resaltar dos estrategias, por su magnitud económica e impacto sobre el sistema hidráulico natural de La Mojana: a) Infraestructura y b) Conservación, Restauración y Manejo Sostenible del Medio Ambiente.

a) Infraestructura: Incluye un dique perimetral paralelo al Río Cauca, con compuertas, canales de drenaje y riego, estructuras de control hidráulico y el terraplén de la vía San Marcos – Majagual – Achí. Las obras propuestas tienen un costo total estimado de 120.000 millones (Documento CONPES 3421 - DNP, 2006) (ver Figura 2.3):

Figura No 2.3. Proyecto dique marginal del Río Cauca



Fuente: Garcés, 2002

En la Tabla 2-3 se muestra el costo de las obras de infraestructura propuestas.

Tabla No 2-3. Vigencias futuras y obras de infraestructura propuestas para La Mojana en el marco del Programa de desarrollo sostenible de la región de La Mojana

Actividades	Años (Cifras en millones de pesos 2006)				
	2006	2007	2008	2009	Total
Obras de defensa fluvial	4.950	-	1.50	-	6.000
Dique perimetral	5.000	20.000	20.000	15.600	60.600
Estructuras de control hidráulico	2.730	14.000	14.270	-	31.000
Terraplen vía San Marcos – Majagual - Achí	-	14.500	-	-	14.500
Interventoría	1.000	2.800	2.800	1.300	7.900
Total	13.680	51.300	38.120	16.900	120.000

Fuente: Conpes - DNP, 2006 cita a Ministerio de Transporte – INVIAS, 2006.

b) Conservación, Restauración y Manejo Sostenible del Medio Ambiente: Con el objeto de garantizar el uso sostenible de la oferta ambiental, recuperar el sistema hídrico y disminuir los procesos de desecación y fragmentación de humedales, así como los conflictos por su uso, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, junto con la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge –CVS-, la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar -CSB-, Corantioquia y Corpomojana, emprendieron dos programas para la delimitación de zonas de protección de humedales prioritarios en la Depresión Momposina – Cuenca del río Sinú y Ciénaga de Zapatosa; y reforestación de las microcuencas de los arroyos grandes de Corozal, San Benito Abad, Sucre y Manzanares.

Adicionalmente, en materia institucional, como respuesta a las deficiencias de coordinación y presencia de las instituciones del Estado presentes en la región, se creó la Alianza PROMOJANA para la Eco Región de La Mojana, conformada por 28 municipios, como un instrumento de promoción y gestión de las acciones regionales de manera conjunta entre las distintas entidades territoriales, instituciones públicas, sector privado, organismos internacionales, gremios y organizaciones comunitarias y sociales.

El pasado 27 de mayo de 2007 el Río Cauca volvió a desbordarse en los municipios de Majagual y Guaranda afectando 350 viviendas, 136.101 personas, 26.959 familias, 24.965 ha de cultivos, más la infraestructura educativa y de salud. Debido a estas inundaciones, el 28 de junio de 2007 se expidió el Decreto 2457 (DGPAD, 2007), por el cual se declara la existencia de una situación de desastre departamental en los municipios de Nechí (Antioquia), Magangué, San Jacinto del Cauca, Montecristo, Tiquisio, Pinillos y Achí (Bolívar), y Guaranda, Majagual y Sucre (Sucre).

Posteriormente entre el 11 y el 20 de agosto de 2007 se presentaron inundaciones por el desbordamiento de los ríos Cauca y San Jorge, así como de algunas ciénagas, afectando los municipios de Guaranda, Achí, San Jacinto del Cauca, San Benito Abad, Caimito y San Marcos.

La revisión del impacto causado por la temporada invernal de los años 2005 y 2007, y de la respuesta en términos de inversión por parte del gobierno, muestra dos elementos:

- Si se desea la construcción de un futuro diferente para la región, es necesario encontrar una solución a la problemática de La Mojana, aunque sea cuantiosa.
- Hay un cambio de concepción en el manejo a las continuas inundaciones que parte de reconocer el papel hidrológico y ambiental de La Mojana, puesto que hasta el año 2006, el INVIAS y el Ministerio de Transporte, habían venido atendiendo la problemática de la región a través de la ejecución de obras de defensa para el control de inundaciones.

Recientemente, durante la fuerte temporada invernal del año 2010 las aguas de los ríos Cauca, Magdalena y San Jorge irrumpieron en La Mojana provocando inundaciones de magnitudes incontrolables en municipios de los departamentos de Sucre, Córdoba y Bolívar, arrasando cultivos, vías y centros poblados. La cifra preliminar de damnificados hasta agosto de 2010

ascendió a más de 160 mil personas (OCHA, 2010), esta situación fue descrita por los medios de comunicación así: *“SOS, ¿se ahoga La Mojana?. Las aguas del Cauca son incontrolables, inunda el casco urbano de Majagual y toda la periferia, y progresivamente toda la región. Por tanto el drama de los mojaneros se agudiza cada vez más. Los habitantes de esta zona aseguran que esta inundación es mayor que las de años anteriores...”* (Diario el Universal de Sucre, Julio 24 de 2010).

Las características de La Mojana y sus inundaciones estacionales, permiten caracterizar a la región como un sistema complejo que requiere la construcción de soluciones que reconozcan y articulen las dimensiones hidráulica, ambiental, económica y social, retomando los aportes de los estudios anteriores, transformando los avances normativos en resultados y procesos integrales, evaluando el resultado de distintas alternativas espacial y temporalmente, en lo que el presente estudio hace aportes a través de herramientas como los Autómatas Celulares, los cuales tienen antecedentes de implementación exitosa en el país en temas similares.

Por lo anterior, en esta investigación, con el modelo de gestión, se busca reconocer el papel fundamental de La Mojana en la regulación ambiental y el equilibrio ecológico, particularmente en la regulación de caudales, sin desconocer las actividades productivas y las condiciones de vida de sus habitantes.

3. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En La Mojana, una región caracterizada por un fuerte desequilibrio social y ambiental, y un complejo sistema hídrico, se presentan frecuentes inundaciones de gran magnitud asociadas a cambios en el sistema de drenaje, en los usos del suelo, y a un cambio cultural en el manejo del agua; sin embargo, hasta el momento, el abordaje de esta problemática desde una visión fragmentada del territorio ha llevado el ecosistema a su límite de sostenibilidad.

Este trabajo de investigación, aborda el problema de las inundaciones estacionales en la zona de la Mojana como un problema complejo dependiente de factores geomorfológicos, ambientales y sociales que se interrelacionan mutuamente, lo que lleva a formular un modelo sistémico que a partir de información secundaria y primaria, simule la respuesta del sistema ante cambios permanentes en los atributos esenciales que identifican el sistema, valorando su impacto sobre la población, el medio ambiente y los usos del suelo.

En consecuencia se pretende diseñar un modelo conceptual para la gestión integral del agua y los usos del suelo en la Mojana utilizando la evaluación multicriterio y autómatas celulares.

Una parte fundamental en la elaboración del modelo es la caracterización de la región y la identificación de patrones y tendencias del sistema, para lo cual se utiliza minería de datos, SIG y herramientas de diagnóstico rural participativo, de manera que se identifique e involucre la naturaleza espacial y dinámica de los fenómenos y actores que componen e influyen sobre un sistema complejo como lo es La Mojana.

Aunque el principal aporte de esta investigación es metodológico, como herramienta de gestión el modelo le aportará elementos a Corpomojana⁶ para identificar tendencias, evaluar alternativas de gestión y formular escenarios alternativos para el desarrollo sostenible de La Mojana, lo que posiblemente redunde en la preservación del ecosistema y la calidad de vida de sus habitantes.

⁶ Corpomojana, como Corporación Autónoma Regional es la autoridad ambiental de la Mojana.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo conceptual para la gestión integral del agua y los usos del suelo en la región de La Mojana a partir de un enfoque sistémico y utilizando autómatas celulares.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Crear la línea base regional orientada a la formulación y diseño de bases de datos en formato raster, que permita implementar un protocolo de modelación dinámico, donde se establezcan las condiciones iniciales, y los escenarios para la modelación y validación.

Evaluar el potencial de las herramientas de Diagnóstico Rural Participativo y del conocimiento experto en la caracterización de variables hidrológicas y socio-económicas a nivel local y regional.

Desde un enfoque sistémico, realizar la caracterización de la región identificando patrones y tendencias del sistema, e interrelaciones internas y externas.

Determinar la probabilidad de inundación de La Mojana, valorando su impacto sobre los usos del suelo, las actividades productivas, la calidad de vida de la población y la sostenibilidad del sistema.

Diseñar un modelo conceptual de La Mojana basado en teoría de sistemas que simule eficazmente la complejidad espacio-temporal de la cuenca.

Diseñar un modelo computacional basado en la teoría de Autómatas Celulares, que permita simular los cambios en los usos del suelo, replicando su dinámica espacial y temporal a partir de reglas sencillas que relacionen dichos usos con otras variables fundamentales del sistema.

5. METODOLOGÍA

5.1 DESCRIPCIÓN DEL ENFOQUE METODOLÓGICO

Este trabajo de investigación aborda el fenómeno de las inundaciones estacionales en la Mojana como un problema complejo, que involucra variables geomorfológicas, ambientales y sociales, para lo cual se formula un modelo sistémico que simula la respuesta del sistema ante cambios en las variables fundamentales del modelo y valora su impacto sobre la población, el medio ambiente y los usos del suelo.

En consecuencia, para construir un modelo que involucre la naturaleza espacial y dinámica de los fenómenos y actores que componen e influyen sobre el sistema se desarrollaron las siguientes actividades:

- Recolección y procesamiento de información primaria por medio de encuestas, talleres y entrevistas.
- Construcción de la línea base regional en formato raster a partir de información secundaria.
- Construcción de manchas de inundación y determinación de probabilidad de inundación a partir de registros de niveles de la red de monitoreo del IDEAM y de la superposición de modelos de elevación digital.
- Diseño del modelo de prospección para simular la dinámica de usos del suelo en La Mojana utilizando Autómatas Celulares.

Con el acompañamiento de personal de Corpomojana se realizó un recorrido por la región desarrollando encuestas y talleres con la comunidad, así como entrevistas semiestructuradas a profesionales de la región, buscando mayor conocimiento sobre la dinámica de los fenómenos naturales y sobre las condiciones de vida. Esta información fue utilizada en la caracterización de la región, en la identificación de prioridades, necesidades y estrategias de vida de los pobladores, así como en la identificación de algunos indicadores y relaciones entre variables que constituyen reglas del sistema.

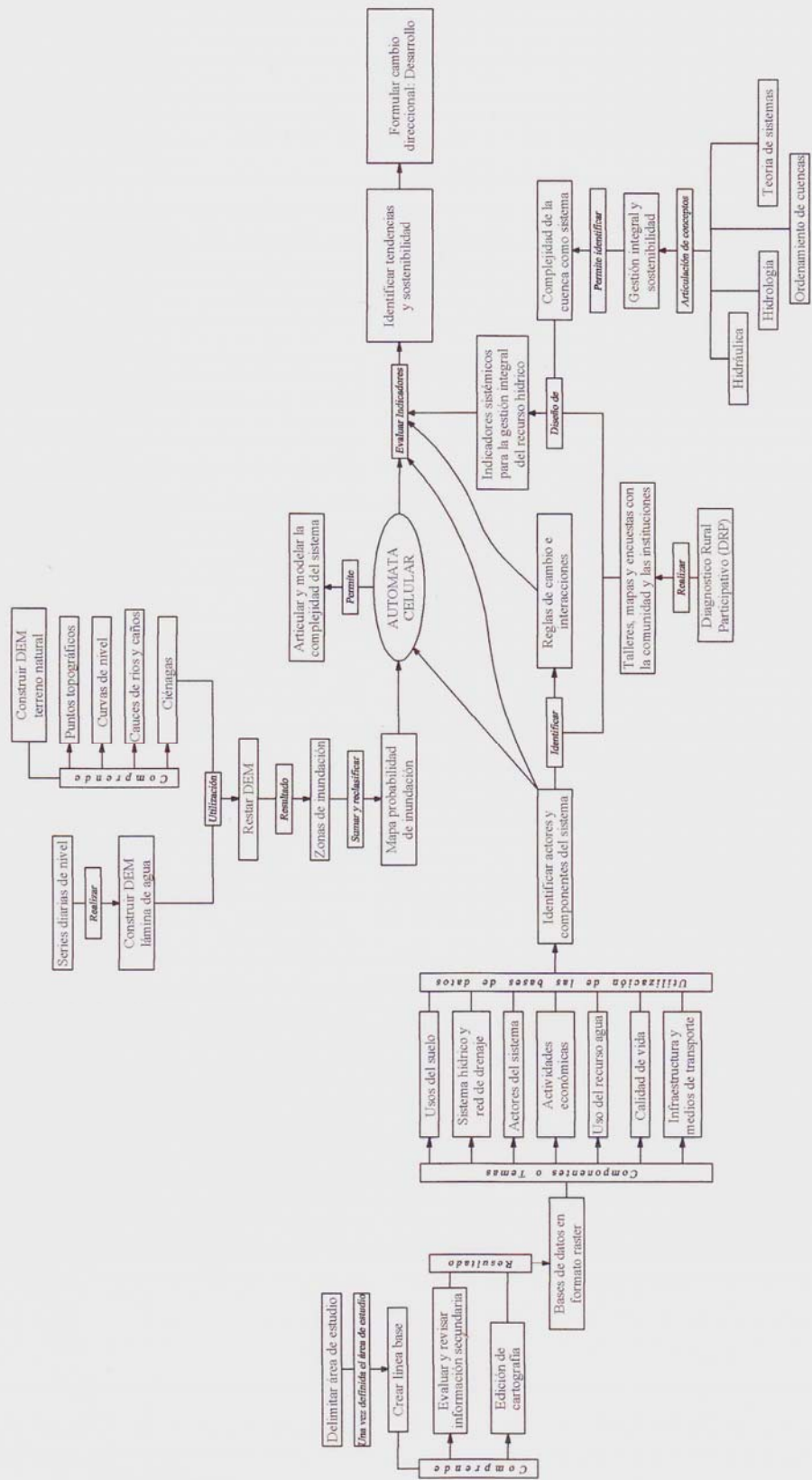
La línea base, construida a partir de información secundaria (principalmente cartografía), constituye bases de datos espacializadas en formato raster sobre usos del suelo, sistema hídrico, población, actividades económicas, medios de transporte y comportamientos frente al uso del recurso agua. Las bases de datos obtenidas se utilizaron para: a) identificar las reglas de cambio del autómata celular que simula la dinámica de usos del suelo; b) establecer las condiciones iniciales del modelo, y c) para la construcción de las manchas de inundación.

Con la cartografía y las encuestas se logró identificar una relación entre las dinámicas de poblamiento, la distribución de las viviendas y la red de vías terrestres y canales fluviales, lo cual permitió construir un mapa de densidad de población en función de estas variables.

Para elaborar las manchas de inundación previamente se construyó un modelo de elevación digital a partir de información cartográfica del IGAC. Adicionalmente se compró y procesó información de niveles medios diarios de 13 estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM con la cual se construyó un modelo de elevación digital que representa la lámina de agua para cada día. Estos dos modelos se interceptaron permitiendo identificar las manchas de inundación diarias.

Las manchas de inundación diarias se sumaron celda a celda de acuerdo al ciclo hidrológico y a los usos del suelo, posteriormente cada mancha de inundación se reclasificó, para lo cual se construyó una curva de duración de niveles y se estimó la probabilidad de inundación de cada celda.

Figura 5.1. Metodología de la Investigación



Para la implementación del modelo de prospección de usos del suelo se utilizaron los mapas de probabilidad de inundación, usos del suelo y densidad de población. Aplicando una plantilla tipo Moore y minería de datos, se construyeron las reglas de cambio que determinan los cambios en el uso del suelo. El modelo fue diseñado utilizando el software MatLab, y para su validación se compararon las características celda a celda de la imagen de salida respecto a la cartografía existente. Aunque el análisis de sensibilidad y la calibración del modelo no son objeto de la presente investigación, se identifican elementos para mejorar el modelo que podrán desarrollarse en investigaciones posteriores.

En la No 5.1 se muestra esquemáticamente la metodología implementada, la cual es descrita detalladamente en los siguientes numerales.

5.2 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Para implementar el modelo conceptual para la gestión integral del agua y los usos del suelo, se recopiló y procesó información primaria y secundaria sobre el uso y vocación del suelo, el sistema hídrico, la red de drenaje, población, calidad de vida, actividades económicas, medios de transporte, y comportamientos frente al uso del recurso agua.

Esta información permite la construcción de:

- Línea base compuesta por información espacializada en formato raster
- Manchas de inundación de la región de La Mojana
- Reglas de comportamiento entre variables
- Condiciones de frontera

5.2.1 Información primaria

La información primaria está compuesta por:

- Encuestas a habitantes de la región
- Talleres con habitantes de la región
- Entrevistas con expertos

5.2.1.1 Encuestas

Con el objeto de obtener información primaria de los habitantes de La Mojana y el San Jorge sobre sus condiciones de vida, actividades económicas, relación con el entorno y su respuesta ante fenómenos naturales, el investigador diseñó y aplicó una encuesta que incluyó los siguientes temas:

- Datos personales
- Familia y vivienda
- Ocupación y actividades económicas
- Dinámica fluvial y relación con el entorno
- Concepción de bienestar
- Servicios básicos
- Identidad, arraigo y expectativas

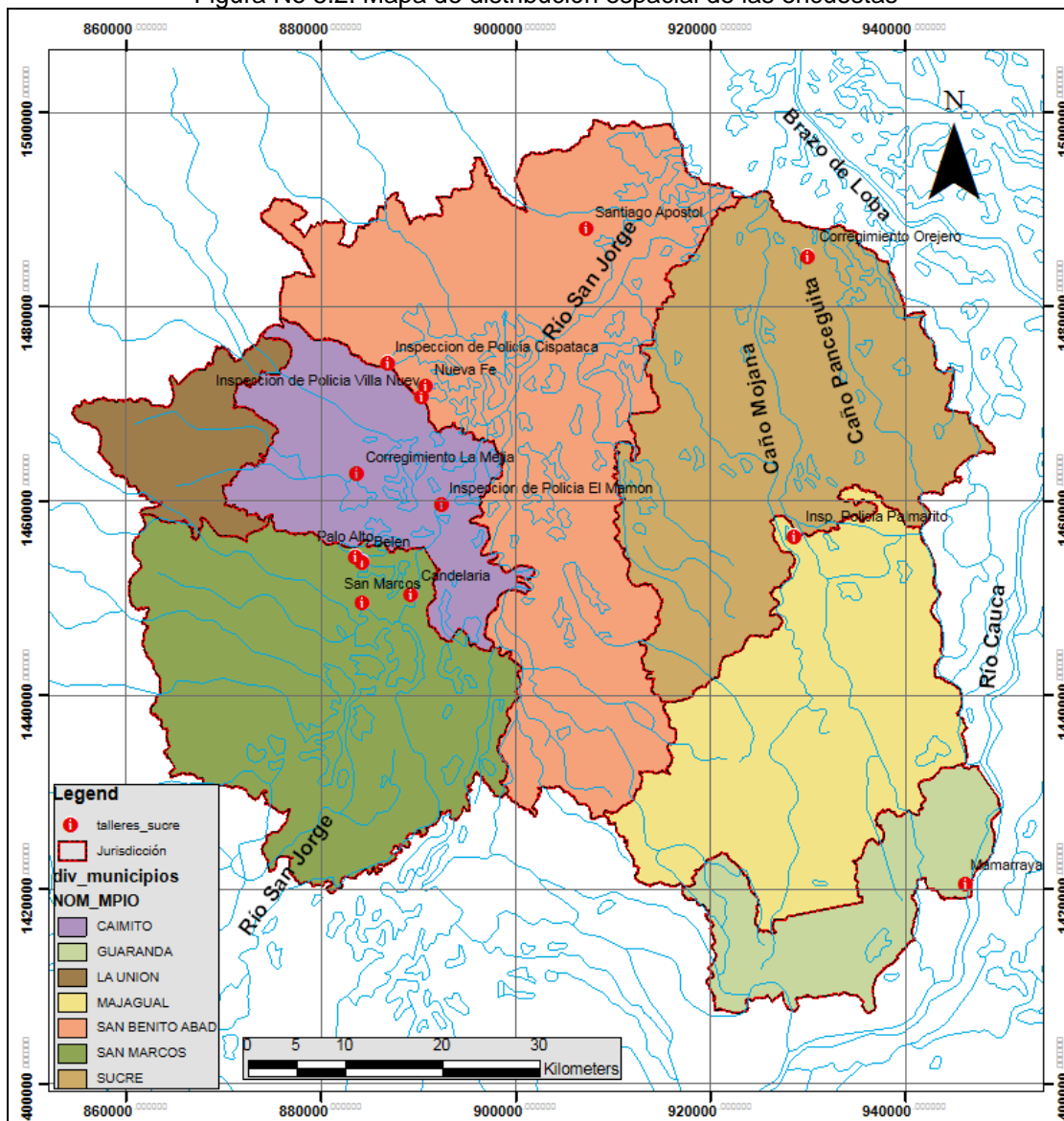
En el **Anexo 1** se muestra el formato aplicado para las encuestas.

Cada encuesta fue aplicada de manera individual a cada encuestado en el período comprendido entre agosto y noviembre de 2009. En total se aplicaron 69 encuestas a habitantes de la región, distribuidos espacialmente en 13 lugares diferentes, dedicados en su mayoría a la pesca y la agricultura, con edades entre 21 y 80 años, y con amplio conocimiento de la región.

Los recorridos por la región, así como las encuestas y talleres se desarrollaron con acompañamiento de personal de Corpomojana, de acuerdo con el cronograma de actividades y comunidades involucradas en el proyecto de “Conservación de la oferta ambiental y funcional de los humedales del sur del departamento de Sucre”.

En la Figura No 5.2 se puede observar la ubicación de las unidades territoriales donde se aplicaron las encuestas a lo largo del río San Jorge, del río Cauca, los caños Mojana y Pancegüita y varios complejos de ciénagas.

Figura No 5.2. Mapa de distribución espacial de las encuestas



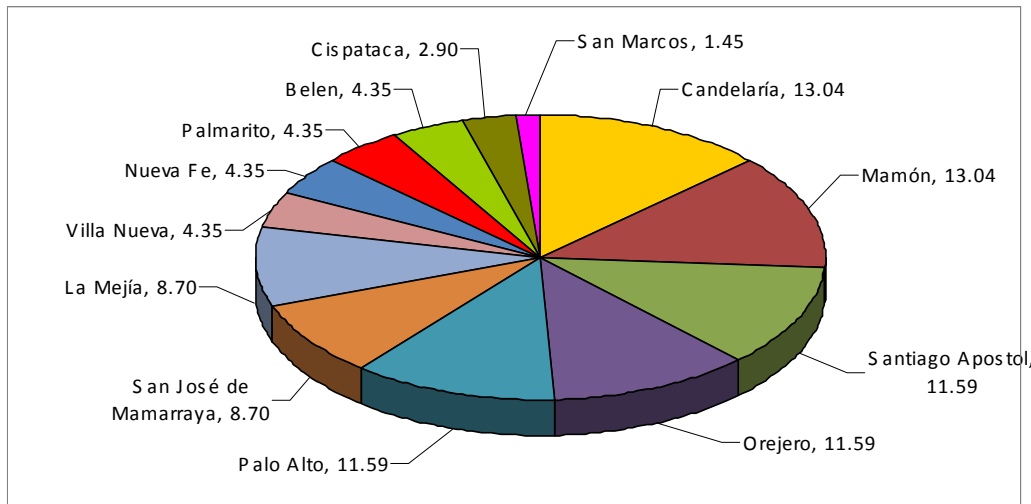
La muestra de la población está conformada por 51 hombres y 18 mujeres, habitantes de 13 poblados que a su vez hacen parte de tres subregiones.

- Subregión San Jorge: Santiago Apóstol, Villa Nueva, San Marcos, Cispataca, Nueva Fe, Palo Alto, Candelaria, Belén, El Mamón, y La Mejía.
- Subregión Mojana: Orejero y Palmarito.
- Subregión Cauca: San José de Mamarraya.

De acuerdo con la Figura No 5.2 y la Figura No 5.3, se puede afirmar que si bien con las encuestas y talleres no se cubrió la totalidad de la región, se logró obtener una muestra espacialmente distribuida por los 6 municipios que conforman La Mojana y el San Jorge. El número y distribución de las encuestas realizadas no responde a ningún criterio de selección estadístico, sino a la disponibilidad de tiempo y programación de Corpomojana.

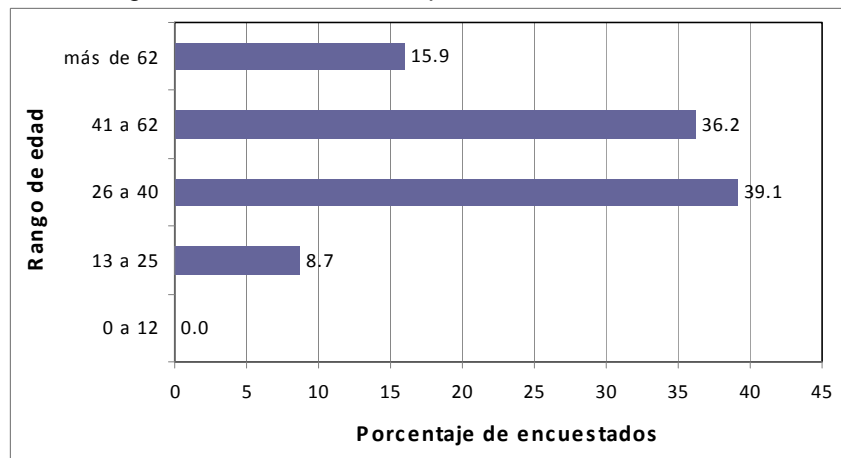
En la Figura No 5.3 se muestra la distribución porcentual de encuestados según el lugar de residencia.

Figura No 5.3. Distribución porcentual de encuestas según sitio de residencia (%)



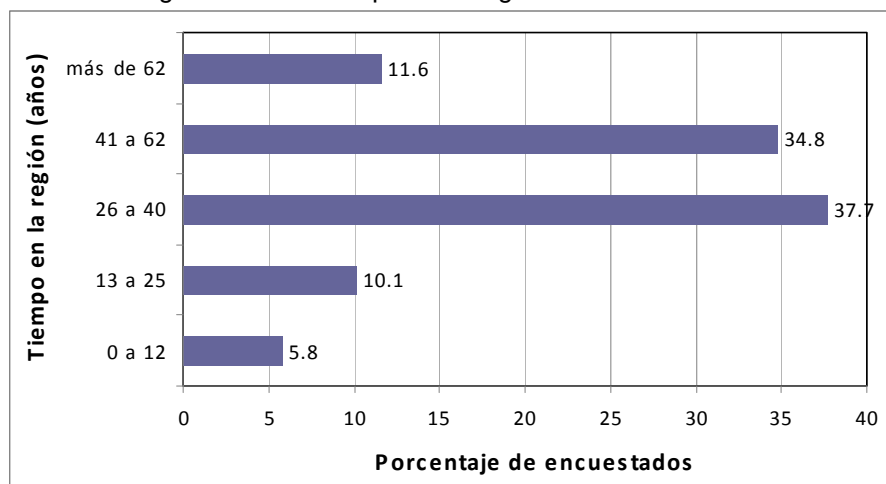
En la Figura No 5.4 se muestra que la mayoría de los encuestados tienen de 26 a 62 años (75.3%), esta población puede considerarse laboralmente activa, con lo cual se garantiza información confiable en temas como la productividad de la región y las distintas fuentes de ingresos.

Figura No 5.4. Distribución por edad de los encuestados



En la Figura No 5.5 se puede observar que el 84% del total de encuestados llevan más de 25 años viviendo en la región, de igual forma, al comparar la edad de cada persona vs. tiempo en la región se puede identificar que más del 80% de los encuestados son oriundos de la Mojana y El San Jorge, lo que garantiza amplio conocimiento del medio físico y de las costumbres de la región.

Figura No 5.5. Tiempo en la región de los encuestados



El número, distribución espacial, edad y procedencia de las personas encuestadas asegura que estos tienen buen conocimiento de la región lo cual cualifica la información obtenida.

Este material representa una muestra de la población que permite hacer generalización en los resultados para la región, pero no puede considerarse información absoluta o inmodificable sino que constituye un punto de partida, dado el dinamismo de las variables sociales, económicas y culturales.

Los resultados de estas encuestas son utilizados para caracterizar la región y sus habitantes, en la determinación de variables e indicadores relevantes del modelo y para establecer objetivos o condiciones que serían deseables de impactar con el modelo diseñado.

5.2.1.2 Talleres

Entre agosto y noviembre de 2009 el investigador realizó 12 talleres con comunidades de la región, con una participación total de 294 personas con edades entre 16 y 84 años (ver Tabla No 5-1), con el objeto de involucrar a los actores presentes en el área de estudio y para conocer la dinámica hídrica de la región y su relación con las actividades productivas.

Tabla No 5-1. Talleres desarrollados con la comunidad

Lugar	No Participantes
Villa Nueva	26
Cispataca	10
Santiago Apóstol	30
Nueva Fe	27
Orejero	26
Palmarito	19
Mamarraya	26
Palo Alto	19
Candelaria	46
Belén	16
Mamón	27
La Mejía	22
Total	294

Los talleres se realizaron con comunidades de pescadores y pequeños agricultores de La Mojana y el Bajo San Jorge, todos habitantes rurales con amplio conocimiento del medio natural y de la

historia local, quienes utilizan los recursos de uso común cotidianamente para el desarrollo de sus actividades productivas.

Los lugares donde se desarrollaron los talleres coincidieron con las jornadas de capacitación sobre preservación ambiental realizadas por Corpomojana con asociaciones de pescadores y pequeños agricultores. En el **Anexo 2** se presenta el listado de participantes en los talleres incluyendo su actividad económica y edad, y en la Figura No 5.2 se muestran la localización de los lugares donde se desarrollaron dichos talleres.

En cada taller se aplicaron cuatro herramientas de diagnóstico rural participativo (DRP)⁷ de acuerdo a las recomendaciones dadas en la publicación *“Herramientas para el Desarrollo Participativo: diagnóstico, planificación, monitoreo, evaluación”* (Geilfus, 1997). Las herramientas utilizadas fueron:

- Perfil Productivo
- Análisis estacional
- Gráfico histórico
- Matriz de evaluación de recursos

En el **Anexo 3** se muestra el formato de herramientas de DRP aplicado en los talleres.

Con el perfil productivo se identificaron las principales actividades económicas de la zona, así como la proporción de población dedicada a cada una de ellas, siendo un método rápido y eficaz para entender en sentido general las características socio-económicas, cualitativas y cuantitativas del grupo de participantes. En la Fotografía No 1 se muestra un habitante de Palo Alto llenando el formato de perfil productivo de acuerdo a las indicaciones dadas.

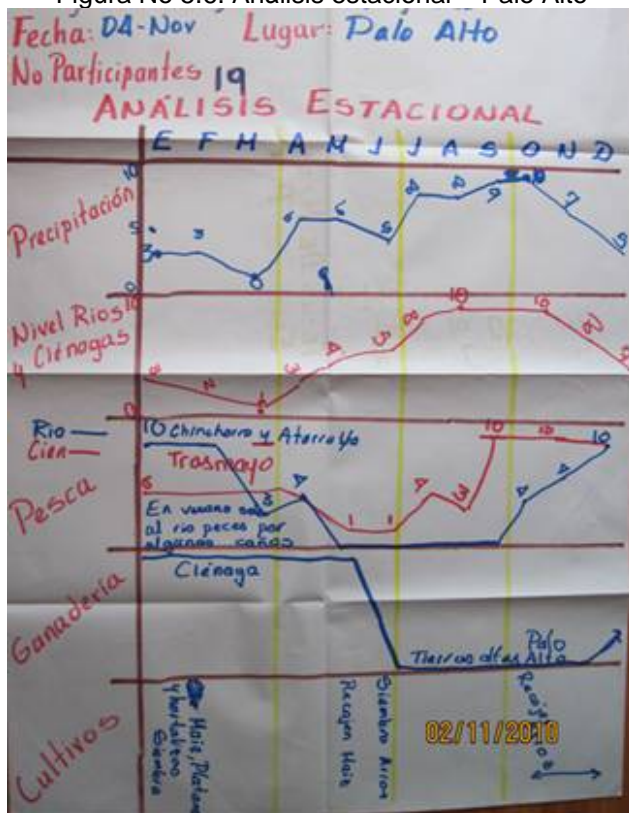
Fotografía No 1. Desarrollo del taller de perfil productivo en Palo Alto



Con el análisis estacional la comunidad representó las variaciones estacionales de la precipitación, nivel de ríos y ciénagas, así como usos del suelo y actividades económicas, permitiendo identificar la dinámica, interrelación y conflictos entre variables (ver Figura No 5.6). Para cada variable se utilizó una escala de 0 a 10 de forma que la comunidad identificara fácilmente los mínimos y máximos según el mes y la variable que se estaba analizando.

⁷ En adelante Diagnóstico Rural Participativo se denominará DRP

Figura No 5.6. Análisis estacional – Palo Alto



Con el gráfico histórico se representaron los cambios que han afectado a la comunidad y los recursos naturales en los últimos 50 años, siendo de gran importancia la participación de personas adultas quienes constituyen la memoria de la comunidad. Los aspectos incorporados en este análisis fueron demografía, pesca, bosque, ganadería, agricultura, nivel del agua y tamaño de los cuerpos de agua (ver Figura No 5.7).

Figura No 5.7. Gráfico histórico – Palo Alto



En la Fotografía No 2 se puede observar a habitantes de Nueva Fe de distintas edades participando en el taller, siendo además una oportunidad para transferir conocimiento entre generaciones, y un espacio para que los jóvenes conocieran como era su pueblo años atrás.

Fotografía No 2. Habitantes de la región participando en los talleres – Nueva Fe



La matriz de evaluación de recursos fue utilizada para evaluar -según criterios de la comunidad- la disponibilidad y calidad de los recursos naturales de uso común, como son los pastos, tierras para cultivar, la pesca, leña, agua potable y los playones.

Para la elaboración de este gráfico la comunidad debió ponerse de acuerdo en los parámetros y criterios de evaluación, discutir la valoración de cada recurso para construir un consenso o para definir por votación la puntuación correspondiente, finalmente la comunidad tuvo la oportunidad de discutir los resultados, evaluar su coherencia y pensar en sus condiciones de vida. En este taller, la utilización de símbolos como caritas felices y tristes permitió la activa participación de personas no alfabetizadas (ver Fotografía No 3).

Fotografía No 3. Habitante de Candelaria llenado la matriz de evaluación de recursos



En cada uno de los talleres se explicó la metodología de la actividad, los objetivos y alcances de la investigación, así como la información que se esperaba obtener de la comunidad. Posteriormente se apoyó al grupo para que ellos mismos llenaran los formatos, discutieran sus calificaciones y

llegaran fácilmente a conclusiones, de manera que la participación y aportes de la comunidad para esta investigación fue muy activa y se ratificó que estas herramientas fueron las apropiadas.

Fotografía No 4. Desarrollo de talleres en Orejero y Candelaria



Los resultados de estos talleres fueron utilizados en la identificación de conflictos y tendencias entre las actividades productivas y los recursos naturales de uso común, en la determinación de los ciclos hidrológicos y en la caracterización de la región. Uno de los aportes más significativos de los talleres con la comunidad es la posibilidad de conseguir información detallada a nivel local, mientras que la información secundaria normalmente se encuentra a nivel departamental y municipal, mas no para el nivel veredal y local.

Adicionalmente con la utilización de herramientas de DRP se logró involucrar a la comunidad como un actor determinante en la identificación de impactos y en la formulación del modelo de gestión.

El **Anexo 4** corresponde a fotografías de las herramientas de DRP aplicadas en cada uno de los talleres. Esta información fue digitalizada en tablas y figuras para facilitar su sistematización y análisis.

5.2.1.3 Entrevistas con expertos

En el proceso de recolección de información se realizaron seis entrevistas a profesionales expertos del área agropecuaria, con más de diez años de experiencia y con buen conocimiento de la región, especialmente se indagó sobre la dinámica de las actividades productivas y de los conflictos ambientales presentes.

Las entrevistas fueron realizadas directamente por el investigador y tuvieron como propósito identificar variables y dinámicas importantes para la modelación, evaluar posibles alternativas para el desarrollo y la sostenibilidad de la región.

Los seis profesionales entrevistados fueron:

Jairo Chima Coneo
Ingeniero Agrónomo. Candidato MBA Universidad del Norte
Coordinador de información Zona Bajo Cauca – Fedearroz
Tiempo de ejercicio: 12 años

Manuel López Navarro
Profesional en Acuicultura
Técnico administrativo grado 2 – Corpomojana
Tiempo de ejercicio: 10 años, con 10 años en la región

Mauricio del Cristo Pupo Romero
Médico Veterinario y Zootecnista
Profesional de Gestión Productiva y Salud Animal – Fedegan
Tiempo de ejercicio: 16 años

Orlando Manuel García M
Ingeniero Agrónomo
Profesional Especializado - Corpomojana
Tiempo de ejercicio: 21 años

Alcides Uparera Ortega
Ingeniero Agrónomo. Especialista en Ciencias Ambientales
Profesional Especializado - Corpomonaja
Tiempo de ejercicio: 26 años, 14 años en la región

Edgardo Hernández Alviz
Ingeniero Agrónomo
Profesional Especializado - Corpomonaja
Tiempo de ejercicio: 35 años, 11 años en la región

La información suministrada en las seis entrevistas fue tabulada en una matriz, para facilitar la identificación de elementos comunes y la diversidad de conceptos sobre cada tema indagado. El análisis de las entrevistas fue utilizado en la formulación de alternativas y en la identificación de conflictos entre actores del sistema.

El **Anexo 5** muestra la matriz utilizada para la sistematización de las entrevistas, en la cual se desagregaron nueve temas comunes que a criterio del investigador son importantes para la caracterización de la región y la formulación del modelo conceptual:

- Variables importantes del modelo
- Inundaciones y actividades productivas
- Cambios en el sistema natural
- Estrategias para el desarrollo y la sostenibilidad
- Impacto de la carretera San Marcos – Majagual
- Crecimiento del hato bufalino
- Indicadores para la sostenibilidad ambiental
- ¿Qué le gustaría que cambiara en La Mojana?
- ¿Qué le gustaría que nunca cambiara en La Mojana?

5.2.2 Información secundaria

La información secundaria está compuesta por:

- Cartografía del IGAC a escalas 1:25.000 y 1:100.000
- Cartografía temática – Corpomojana
- Información hidrológica (IDEAM)
- Estadísticas demográficas (DANE, 2005)
- Sistema de información agropecuaria (Umata 2000-2005)
- Censo Bovino (Fedegan 1999-2009)
- Censo Arrocerero (Fedearroz 2000-2007)
- Producción pesquera (Corpomojana)

5.2.2.1 Cartografía – IGAC

Con la cartografía a escala 1:100.000 se realizó la identificación de los principales cuerpos de agua (ríos, caños y ciénagas), poblaciones, accidentes geográficos y obras de infraestructura. Esta información permitió la adecuada delimitación del área de estudio y la formulación del modelo hidráulico en cuanto a puntos de control y red de drenaje.

También se utilizaron 69 planchas IGAC a escala 1:25.000, de estas se obtuvieron 1054 puntos con coordenadas X, Y, Z, los cuales fueron incorporados en el modelo de elevación digital del terreno natural. Los puntos tomados corresponden a 568 cotas fotogramétricas, 174 puntos de aerotriangulación, 1 punto auxiliar, 43 puntos de triangulación, 21 puntos estereoscópicos, 4 puntos geodésicos y 223 puntos de radiotriangulación (ver Tabla No 5-2).

Tabla No 5-2. Cartografía IGAC utilizada en la investigación

Plancha	Escala	Año	Plancha	Escala	Año
62	1:100.000	1962	63-III-D	1:25.000	1960 - 1981
72	1:100.000	1962	63-IV-A	1:25.000	1960 - 1983
82	1:100.000	1968	63-IV-B	1:25.000	1960 - 1983
45	1:100.000	1960	63-IV-C	1:25.000	1960 - 1983
53	1:100.000	1961	63-IV-D	1:25.000	1960 - 1983
63	1:100.000	1961	64-I-A	1:25.000	1960
73	1:100.000	1961	64-I-B	1:25.000	1960
46	1:100.000	1960	64-I-C	1:25.000	1960
54	1:100.000	1962	64-I-D	1:25.000	1960
64	1:100.000	1961	64-II-A	1:25.000	1960
74	1:100.000	1961	64-III-A	1:25.000	1991
53-II-D	1:25.000	1960 - 1981	64-III-C	1:25.000	1960 - 1991
53-III-D	1:25.000	1960 - 1981	73-I-A	1:25.000	1960 - 1993
53-IV-A	1:25.000	1960 - 1981	73-1-B	1:25.000	1983
53-IV-B	1:25.000	1960 - 1981	73-I-C	1:25.000	1993
53-IV-C	1:25.000	1960 - 1981	73-I-D	1:25.000	1983
53-IV-D	1:25.000	1960 - 1981	73-II-A	1:25.000	1983
54-III-C	1:25.000	1960	73-II-B	1:25.000	1960 - 1983
63-I-A	1:25.000	1981	73-II-C	1:25.000	1983
63-I-B	1:25.000	1981	73-II-D	1:25.000	1983
63-I-C	1:25.000	1981	73-IV-A	1:25.000	1983
63-I-D	1:25.000	1960 - 1981	73-IV-B	1:25.000	1991
63-II-A	1:25.000	1960 - 1981	73-IV-C	1:25.000	1983
63-II-B	1:25.000	1981	73-IV-D	1:25.000	1960
63-II-C	1:25.000	1960 - 1981	74-I-A	1:25.000	1960 - 1991
63-II-D	1:25.000	1981	74-I-C	1:25.000	1960 - 1991
63-III-A	1:25.000	1960 - 1981	74-III-A	1:25.000	1960
63-III-B	1:25.000	1960 - 1981	74-III-C	1:25.000	1960
63-III-C	1:25.000	1960 - 1981			

5.2.2.2 Cartografía temática - Corpomojana

Producto de varios estudios Corpomojana ha elaborado un sistema de información geográfico que abarca los municipios de La Unión, San Marcos, Caimito, San Benito Abad, Guaranda, Majagual y Sucre.

En el año 2002 Corpomojana elaboró el Plan de Gestión Ambiental Regional (Corpomojana, 2002), en dicho estudio se evaluaron dos parámetros básicos: los tipos de utilización de la cobertura de la tierra y las cualidades de la misma. Para tal fin Corpomojana realizó interpretación de imágenes de

satélite⁸, con comprobación cartográfica en campo. Como producto de este estudio se originó la siguiente cartografía temática:

- Mapa de Suelos
- Mapa Procesos Denudativos.
- Mapa de Capacidad de Uso
- Mapa Fisiográfico
- Mapa Cobertura Vegetal
- Mapa Uso Actual
- Mapa Conflictos de Uso
- Mapa de Zonificación Ecológica
- Mapa Geomorfológico
- Mapa Socioeconómicos
- Mapa Amenazas por Procesos Erosivos
- Mapa Zonificación Ambiental.

En otros proyectos entre los que cabe mencionar el Plan de Manejo Ambiental de los Humedales Asociados al Bajo Río San Jorge (Corpomojana, 2000) y la Delimitación y Definición de Zonas de Protección de los Humedales Prioritarios de la Depresión Momposina en Jurisdicción de Corpomojana y C.S.B. (Corpomojana, 2007), se construyó cartografía temática sobre:

- Mapa Hidrográfico
- Mapas de Espejos de Aguas Bajas (Imagen Lansat ETM, marzo de 2001)
- Mapas de Espejos de Aguas Altas (Imagen Lansat ETM, enero de 2001)
- Mapa de obras de infraestructura que causan fragmentación de humedales y su alteración hidrológica.
- Mapa de Delimitación de Ciénagas y Humedales

De igual forma el sistema de información tiene cartografía base sobre:

- Límites de la jurisdicción de Corpomojana
- División político – administrativa
- Delimitación cuencas hidrográficas
- Red de drenaje
- Hidrogeología
- Ciénagas y humedales
- Curvas de nivel cada 25 metros
- Red vial e infraestructura
- Centros poblados
- Escuelas
- Casas

Para esta investigación Corpomojana permitió el uso de su cartografía, la cual se utilizó en la delimitación del área de estudio, en la construcción de la línea base y en la implementación del Automata Celular.

5.2.2.3 Información hidrológica - IDEAM

Para determinar la probabilidad de inundación en cada celda del Automata Celular se elaboraron previamente las manchas de inundación diarias para tres años consecutivos. En consecuencia se compró y procesó información de niveles medios mensuales de 13 estaciones limnimétricas (LM) y limnigráficas (LG) del IDEAM (ver Tabla No 5-3).

⁸ Imágenes de satélite Landsat de fecha julio del 2001 en formato GeoTIFF

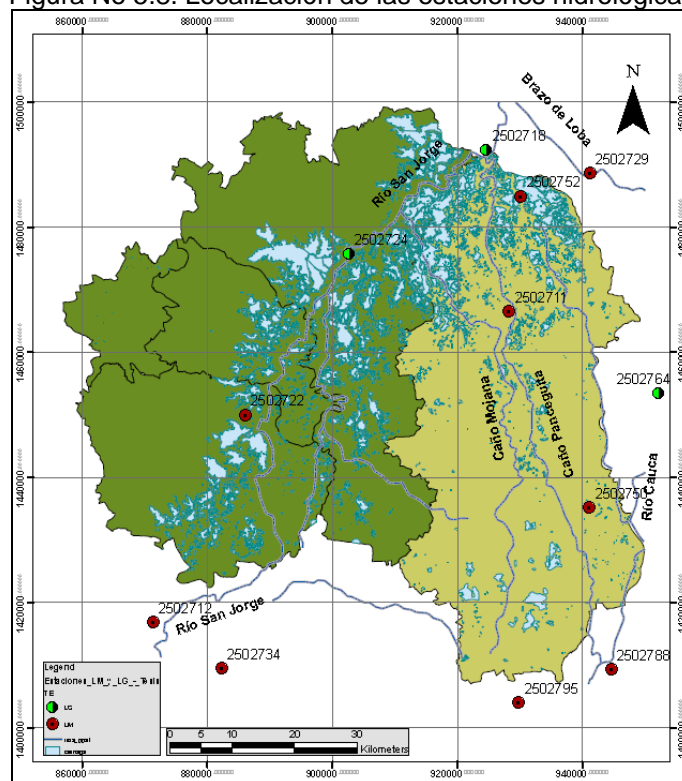
Tabla No 5-3. Estaciones LG y LM utilizadas en la investigación

CODIGO	TE	NOMEST	CORRIENTE	LONG	LATIT	ELEV IDEAM
2502722	LM	SAN MARCOS	CGA SAN MARCOS	885998	1449997	20
2502752	LM	OREJERO	CNO PANCEGUITA	930087	1484926	19
2502711	LM	SUCRE	CNO MOJANA	928221	1466494	20
2502764	LM	TRES CRUCES	CAUCA	952045	1453556	22
2502795	LM	SAN JACINTO	CAUCA	929952	1403814	35
2502736	LM	ARMENIA	BZO DE LOBA	964903	1475663	21
2502768	LM	MAGANGUE-ESPERANZA	BZO DE LOBA	928304	1512582	16
2502729	LM	SITIO NUEVO	BZO DE LOBA	941090	1488595	19
2502734	LM	BEIRUT	CGA AYAPEL	882217	1409447	25
2502712	LM	MARRALU	SAN JORGE	871220	1416853	20
2502750	LM	MAJAGUAL	CNO MOJANA	941013	1435136	20
2502724	LG	JEGUA	SAN JORGE	902571	1475765	20
2502718	LG	SAN ANTONIO	SAN JORGE	924602	1492310	17
2502788	LM	GALINDO	CAUCA	944650	1409323	33

Fuente: IDEAM

A partir de los registros mensuales se seleccionaron los años 1994 a 1996 para la compra y procesamiento de niveles medios diarios de las 13 estaciones. En la Figura No 5.8 se muestra la localización de las estaciones mencionadas.

Figura No 5.8. Localización de las estaciones hidrológicas



Producto de fenómenos hidráulicos como el remanso del río Magdalena, el reflujo aguas arriba por el río San Jorge y el almacenamiento de grandes cantidades de agua en las ciénagas, en la región el IDEAM no lleva registros de caudal ni curvas de capacidad de las estaciones.

5.2.2.4 Estadísticas demográficas (DANE, 2005)

Para el análisis de población se utilizaron las proyecciones y estadísticas del DANE, específicamente las proyecciones 1985 – 2010 del censo básico, herramienta REDATAN 2005. Estas cifras permitieron validar la información demográfica suministrada por la población en los talleres de DRP.

5.2.2.5 Sistema de información agropecuaria (Umata 2000-2005)

Para la valoración cualitativa de las actividades agropecuarias se utilizaron los datos de los Consensos agropecuarios municipales 2000 – 2005 elaborados por la Secretaria de Desarrollo Económico y Medio Ambiente de Sucre a través de las UMATA`s – URPA.

Estas estadísticas contienen información sobre:

- Área sembrada, producción, rendimiento, costos y comercialización de los principales productos agrícolas.
- Inventario pecuario. Ganado bovino, producción de leche, área de pastos, y otras especies pecuarias.
- Evaluación acuícola.

5.2.2.6 Censo Bovino (Fedegan 1999-2009)

El Fondo Nacional del Ganado (FEDEGAN), como parte del programa nacional de erradicación de la fiebre aftosa desarrolla el censo de predios y población según especie, el cual contiene información de predios y del hato ganadero bovino, porcino, equino, caprino, ovino y bufalino en la región para los años 1999 a 2009. Estos registros se utilizaron en el análisis del desarrollo histórico del hato ganadero.

5.2.2.7 Censo Arrocerero (Fedearroz 2000-2007)

El Fondo Nacional del Arroz (FEDEARROZ) ha realizado tres censos nacionales del arroz, en los cuales se encuentra información sobre la producción de arroz en cada municipio y departamento. En esta investigación se utilizaron los registros del II y III Censo Nacional Arrocerero, Zona Bajo Cauca.

5.2.2.8 Producción pesquera (Corpomojana)

Para el análisis de la producción pesquera en cuanto a producción, rendimientos y comercialización, se utilizó información de Corpomojana consignada en el Proyecto de Análisis y Evaluación de la Dinámica Pesquera en el Bajo Río San Jorge y La Mojana.

5.3 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

La dinámica del sistema hídrico fue incorporada al Autómata Celular a través de mapas de probabilidad de inundación.

Previamente se elaboró un modelo de elevación digital del terreno en formato Raster, el cual se interceptó con el modelo de elevación digital de la superficie de agua de cada día, obteniéndose las manchas de inundación diaria. La superficie de agua fue construida con la información de las estaciones LM y LG seleccionadas para el estudio.

5.3.1 Modelo de elevación digital del terreno

En el Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM) se incorporaron:

- 1054 puntos topográficos tomados de cartografía 1:25.000 (ver numeral 5.2.2.1).
- 2547 polilíneas que representan las curvas de nivel cada 25 metros según cartografía base de Corpomojana a escala 1:25.000 (ver numeral 5.2.2.2).
- El trazado en planta de los principales cauces de la región: río San Jorge, caño Carate, caño Mojana y caño Panceguita, de acuerdo con la cartografía base de Corpomojana a escala 1:25.000 (ver numeral 5.2.2.2). No se incluyeron los río Magdalena y Cauca, ya que aunque constituyen un límite físico al área de estudio, no hacen parte de la misma.
- 2923 polilíneas tomadas de la cartografía base de Corpomojana 1:25.000 (ver numeral 5.2.2.2), las cuales representan el contorno de las principales ciénagas.

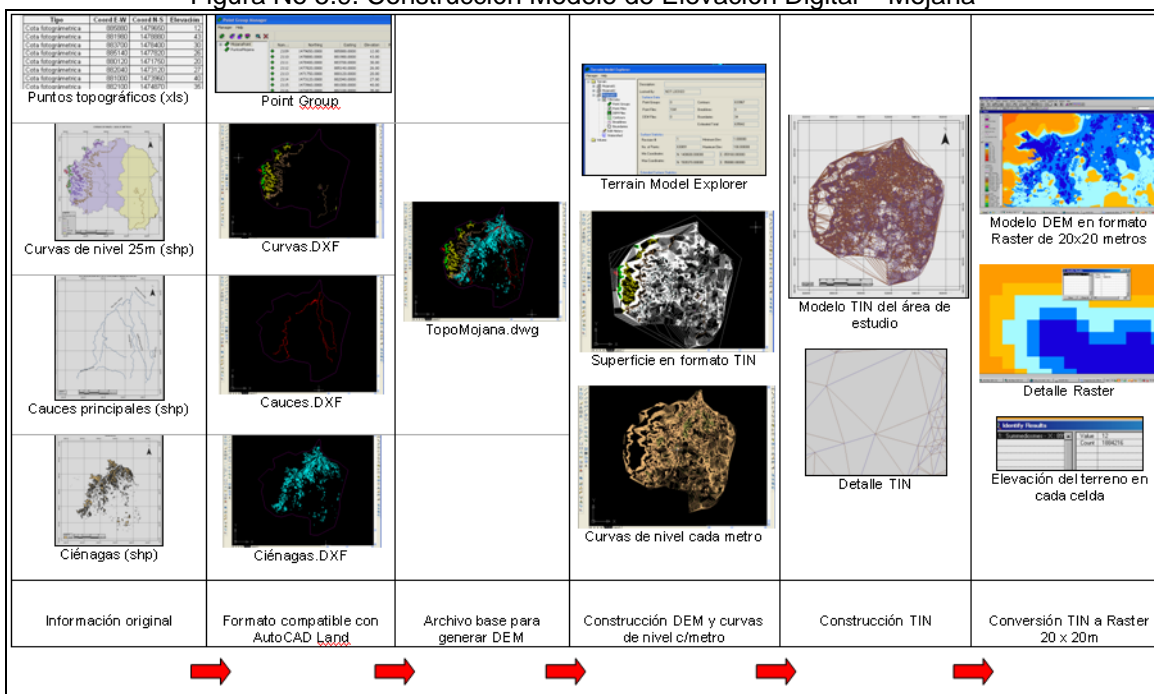
Los puntos y polilíneas antes descritos fueron convertidos a un formato compatible con AutoCAD Land, Point Group para los puntos topográficos y DXF para las polilíneas, posteriormente se agruparon en un solo archivo llamado TopoMojana.dwg.

En AutoCAD Land se aplicó la herramienta Terrain Model Explorer para construir un modelo de elevación digital del terreno. De este modelo se generaron curvas de nivel cada metro, las cuales fueron convertidas a DXF de manera que pudieran ser reconocidas por ArcGIS.

Con el software ArcGIS, utilizando la extensión 3D Analyst se generó una estructura de red triangulada (TIN). Posteriormente a partir del modelo TIN se generó un DEM en formato Raster con celdas de 20m x 20m, de manera que la superficie quedó representada por una matriz bidimensional de celdas con tamaño constante donde el valor de cada celda representa la elevación del terreno.

El tamaño de celdas de 20 m x 20 m, fue seleccionado teniendo en cuenta el ancho promedio de los ríos y caños durante la época de estiaje, con el objeto de garantizar su representación en las manchas de inundación. En la Figura No 5.9 se describe la metodología empleada en la construcción del modelo de elevación digital del terreno.

Figura No 5.9. Construcción Modelo de Elevación Digital – Mojana



5.3.2 Manchas de inundación diarias y probabilidad de inundación

En el proceso de construcción de las manchas de inundación es necesario diferenciar cuatro etapas: generación de series diarias de nivel para cada estación, validación de la metodología propuesta, generación de manchas de inundación y cálculo de probabilidad de inundación de cada celda.

5.3.2.1 Selección período de modelación

Con los registros de nivel medio multianual se identificaron los años en los cuales la mayoría de las 13 estaciones hidrológicas tenían registros de nivel, producto de este análisis se seleccionaron los años 1994 a 1996 para la generación de series diarias de niveles medios (ver Tabla No 5-4).

Tabla No 5-4. Niveles medios multianuales para las 13 estaciones hidrológicas

AÑO	San Marcos	Orejero	Sucre	Tres Cruces	San Jacinto	Armenia	Magangue Esperanza	Sitio Nuevo	Beirut	Marralu	Majagual	Jegua	San Antonio	Galindo
1972	23.79		22.36						29.15				24.73	
1973	24.06					27.31	21.83		27.97					
1974	24.08		22.73	29.24		28.51	22.54		28.09				24.94	
1975	23.66			28.54		28.39	22.03		28.97				24.69	
1976			22.49			28.16	21.45						24.38	21.40
1977	23.71		22.71	27.30	40.16	27.23	23.27			23.95			23.84	21.56
1978	23.96		22.75	27.98	38.16	27.70	21.75		28.62	24.54			25.02	21.48
1979	24.02		22.94	26.90	37.09	29.16	22.05		28.84	22.48			24.17	21.54
1980	23.91		22.53	27.26	37.78	27.49	20.68	23.10	28.98	23.32			23.73	20.47
1981	24.50		22.85	28.91	38.19	28.63	22.68		30.51	25.61			24.79	21.77
1982	24.00		22.69	28.51	38.45	28.97	22.13	25.85	29.63	25.89			24.60	21.61
1983	23.78		22.24	27.76	38.46	27.67	21.13		29.44	25.77			23.91	20.41
1984	24.42		22.86	28.72	38.81	28.78	22.35		29.62	24.66			24.61	21.80
1985	23.90		22.37	27.95	38.08	27.95	21.11	26.19	29.03	24.16			23.79	20.78
1986	24.17		22.26	27.98	38.33	28.37	21.51	25.93	28.75	23.99			23.87	20.86
1987	24.36		22.75	27.36	38.15	28.01	21.83	26.22	29.19	24.19			23.82	20.67
1988	24.26		23.02	28.16	38.85	28.98	23.87	28.58	29.92	25.27			24.95	21.42
1989	24.30		22.65	28.67	38.63	28.88	22.24	26.79	29.05	24.41			24.57	21.63
1990	24.23	21.66	22.56	27.96	38.23	28.27	21.88	25.93	29.39	24.40	22.30		23.83	20.87
1991	23.95	20.93	22.43	27.82	38.22	27.96	21.64	24.74	29.14	24.80	22.88		23.55	20.37
1992	23.66	20.42	22.49	27.16	38.39	27.25	21.05	24.76	28.53	23.94	21.29		24.01	20.03
1993	23.94	21.39	22.58	28.33	39.09	29.48	21.61	26.75	29.19	25.33	23.66		23.84	20.86
1994	24.08	21.94	22.66	28.74	39.09	28.77	22.35	26.92	29.23	24.35	23.23		24.50	21.57
1995	24.23	23.19	22.51	28.60	38.83	28.98	22.43	26.39	29.03	24.45	21.25		24.16	21.35
1996	24.70	23.10	22.41	29.21	39.11	30.34	23.06	27.43	29.59	24.99	23.19		25.14	22.39
1997	23.59	20.99		27.88	38.77	28.29	21.12	25.19	29.88	22.84			24.27	
1998	24.17	22.62	21.99	29.05	38.88	29.04	21.89	26.06	30.20	23.28			24.09	20.55
1999	25.10	23.33	23.57	30.19	40.01	30.36	23.87	27.94	29.80	23.81			25.74	23.04
2000	24.91	22.66	22.46	29.23	39.33	30.00	23.11	27.24	30.03	23.54			25.44	22.39
2001	24.27	21.03	22.74	27.83	38.80	28.85	21.54	25.40	29.23	22.79			23.67	20.54
2002	24.59	21.35	22.92	27.52	38.14	28.91	21.35	25.56	29.97	22.94			23.92	20.90
2003	24.59	21.63	22.37	25.44		27.26	21.66	25.91	29.66	22.89	22.97		24.45	21.05
2004	24.61	22.03	22.95	28.15		29.42	22.15	26.23	29.56	23.35	22.25		24.23	21.31
2005	24.52	22.10	22.77	28.65		29.55	22.59	26.03	29.25	23.46	22.16		24.07	21.47
2006	24.90	22.60	23.02	28.94		30.10	23.02	27.11	29.65	23.26	22.27		25.05	22.48
2007	24.94	22.84	23.07	29.25		29.97	23.47	26.97	29.64	23.73	22.52		25.07	22.64
2008	25.00	22.91	23.29	29.15		30.27	23.42	27.40	30.09	24.98	22.41		25.50	23.16
MEDIOS	24.24	21.94	22.68	28.41	38.64	28.71	22.01	26.22	29.25	23.93	22.13		24.37	21.36
MAXIMOS	26.73	25.00	24.69	30.94	40.86	31.32	25.35	28.86	31.50	27.25	25.03		27.25	24.98
MINIMOS	20.52	19.00	20.00	24.58	35.86	24.22	18.02	21.81	25.49	20.29	20.00		20.30	17.26

Para la generación de las manchas de inundación se adopta una escala diaria durante tres años con el objeto de tener la mayor cantidad de imágenes posibles y así generar mapas de probabilidad de inundación que capten y representen la textura, magnitud y dinámica del fenómeno.

5.3.2.2 Correlación entre estaciones y estimación de datos faltantes

Teniendo en cuenta que los registros de niveles diarios tenían datos faltantes fue necesario realizar el relleno de los mismos, para lo cual previamente se evaluó la correlación entre estaciones de manera que fuera posible generar los datos faltantes a partir de los registros de estaciones vecinas.

Para determinar la mejor correlación entre estaciones se generaron sintéticamente los niveles medios de meses tanto del período húmedo como del período seco en los cuales se contaba con los registros de todas las estaciones involucradas, de manera que pudiese estimarse el error en el cálculo.

El llenado de los datos faltantes se realizó mediante la siguiente expresión:

$$P_x = \frac{1}{n} * \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right]$$

Donde:

N_x es el nivel medio mensual de la estación a la que le hacen falta datos.

N₁ a N_n son los niveles medios de las estaciones vecinas.

P₁ a P_n es el nivel del dato faltante en las estaciones vecinas.

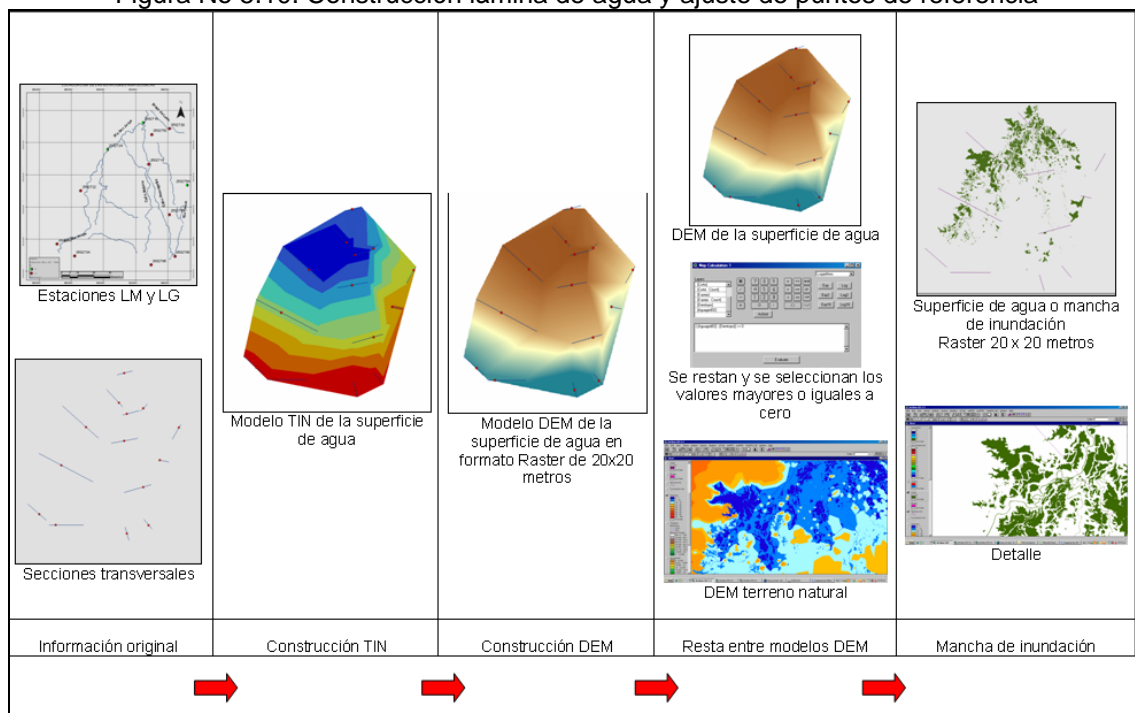
5.3.2.3 Construcción de series diarias de nivel

Una vez se completaron las series de niveles medios diarios, se procedió a construir las manchas de inundación correspondientes a cada día utilizando el software ArcGIS.

El proceso de construcción de las manchas de inundación consta de los siguientes pasos básicos (ver Figura No 5.10):

1. Definición de secciones transversales para cada estación limnimetrica (LM) y limnigrafica (LG).
2. Construcción de una superficie TIN de la lámina de agua a partir de los registros de nivel de las estaciones LM y LG.
3. Conversión de la superficie TIN a un modelo de elevación digital en formato Raster con celdas 20 x 20 m.

Figura No 5.10. Construcción lámina de agua y ajuste de puntos de referencia



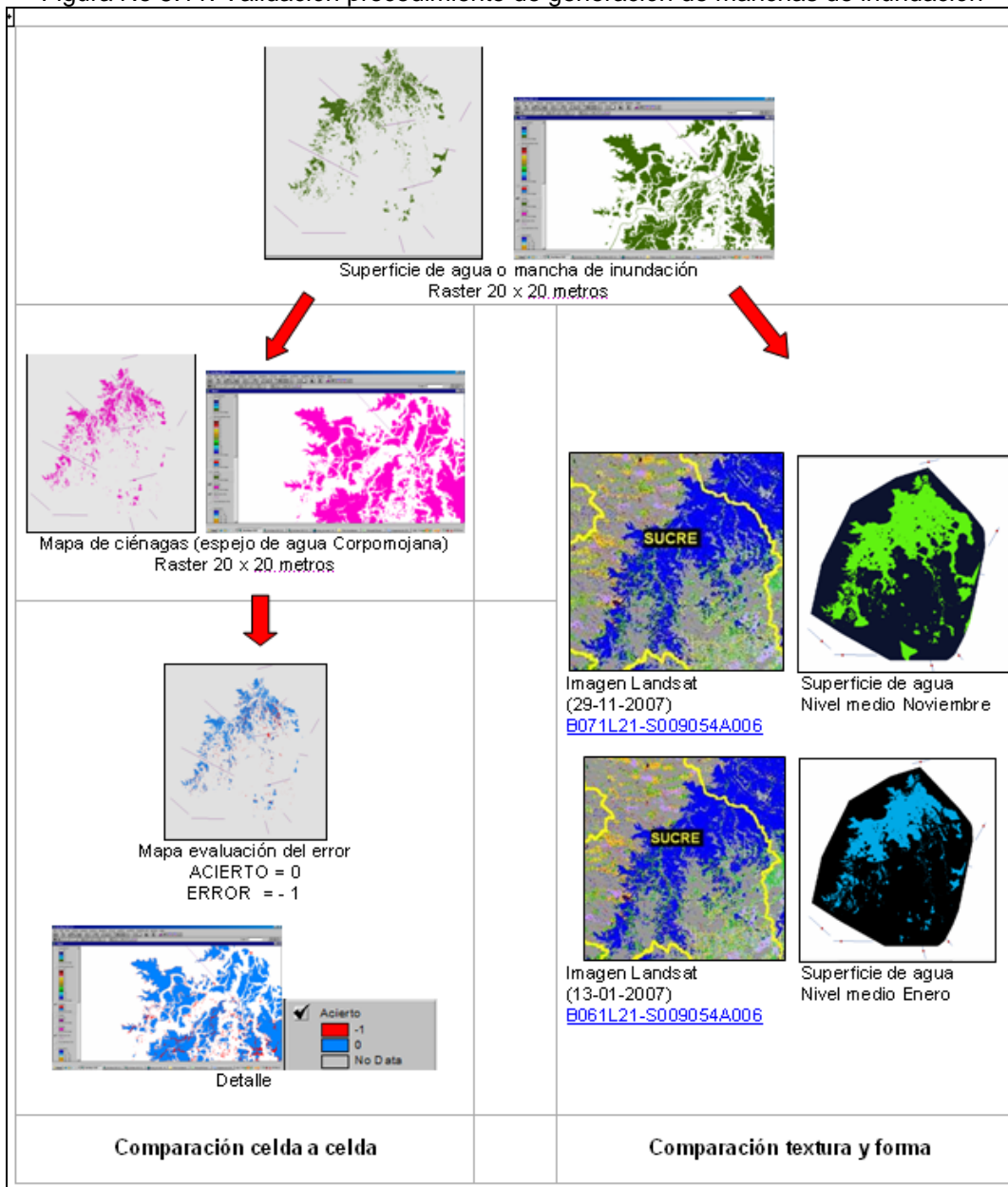
4. Utilizando algebra de mapas se resta celda a celda el Modelo de Elevación Digital (DEM) de superficie de agua con el Modelo de Elevación Digital (DEM) de superficie natural del terreno, obteniéndose la profundidad del agua sobre el terreno en cada celda de 20 x 20 m.

5. Para diferenciar las celdas de terreno inundado del terreno sin presencia de agua, se aplica una función lógica para seleccionar los valores mayores o iguales a cero, obteniendo las manchas de lámina de agua.

5.3.2.4 Validación de la metodología propuesta para construir las manchas de inundación

Para validar la metodología utilizada en la construcción de las manchas de inundación consistente en la superposición y resta de la lámina de agua y el DEM del terreno natural, se utilizaron dos alternativas (ver Figura No 5.11):

Figura No 5.11. Validación procedimiento de generación de manchas de inundación



- Comparación celda a celda del espejo de agua del mes de marzo generado en ArcGIS con el mapa de ciénagas que hace parte de la cartografía base de Corpomojana. El mapa de ciénagas equivale a la lámina de agua durante el período de aguas bajas el cual fue elaborado por Corpomojana a partir de una imagen satelital de marzo de 2001.
- Comparación visual de las manchas de inundación de distintos meses con imágenes satelitales.

Al generar las manchas de inundación con la información suministrada por el IDEAM se encontró que el nivel de referencia de las estaciones era muy alto, de manera que toda la región se inundaba incluso durante los meses de estiaje (Enero – Abril). Por lo anterior fue necesario ajustar el nivel de referencia de las estaciones hidrológicas a partir de información cartográfica del IGAC, de manera que el sistema de referencia del modelo de elevación digital y de las estaciones coincidiera. En la Tabla No 5-5 se muestra el ajuste realizado a la elevación de cada una de las trece estaciones limnimétricas y limnigráficas.

Tabla No 5-5. Modificación nivel de referencia de las estaciones hidrológicas

Estación	Nivel de ref IDEAM (msnm)	Nivel de ref Tesis (msnm)
San Marcos	20.0	8.3
Orejero	19.0	6.8
Sucre	20.0	7.7
Tres Cruces	22.0	9.3
San Jacinto	35.0	17.6
Armenia	21.0	5.9
Magangue Esperanza	16.0	4.6
Sitio Nuevo	19.0	3.9
Beirut	25.0	14.6
Marralu	20.0	15.1
Majagual	20.0	10.4
Jegua	20.0	6.3
San Antonio	17.0	6.4
Galindo	33.0	14.6

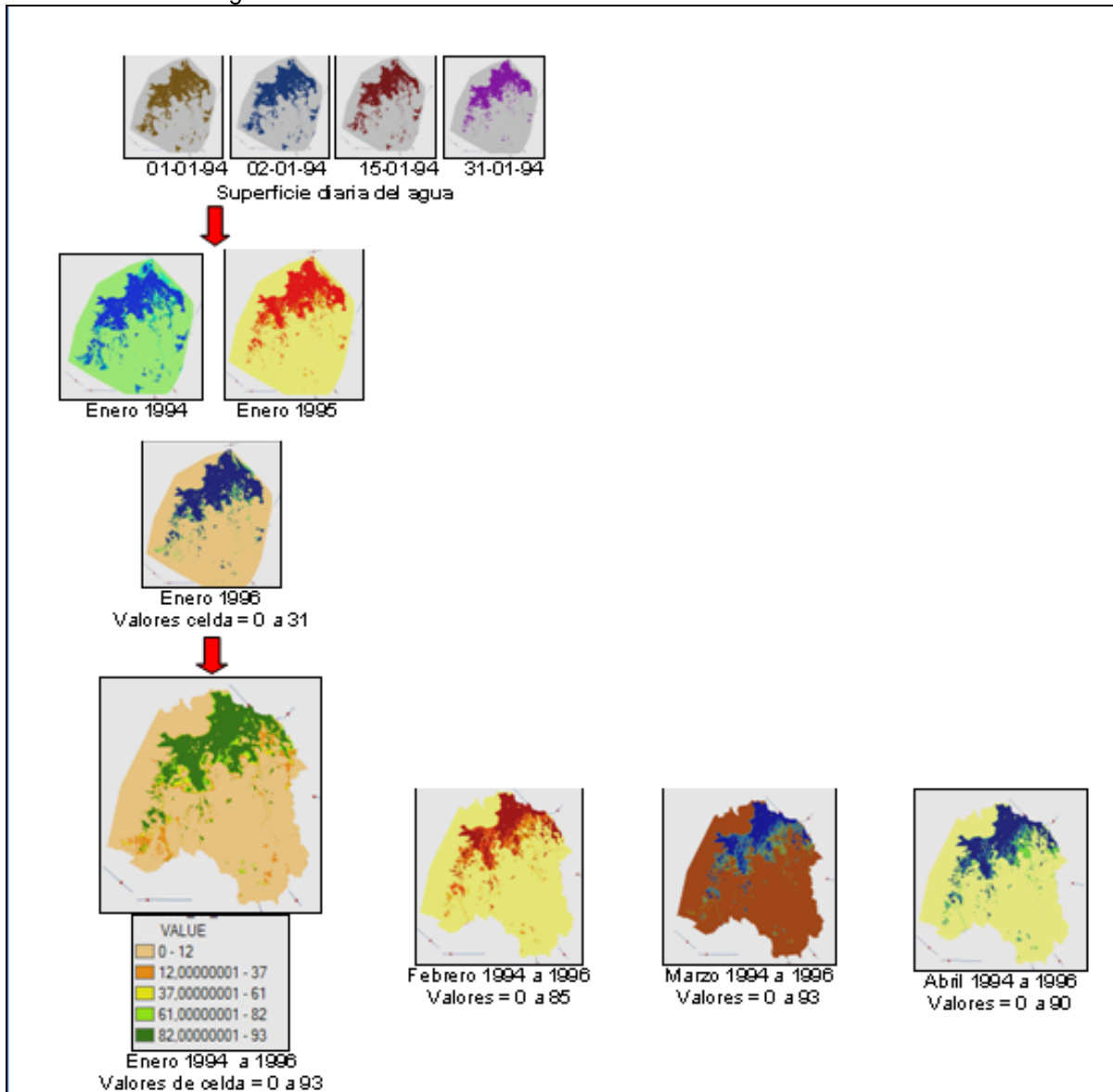
5.3.2.5 Construcción de manchas de inundación

Durante el desarrollo de la Tesis se identificó una relación entre el ciclo hidrológico y las actividades productivas de la región. Este análisis permitió correlacionar los usos del suelo y las manchas de inundación, razón por la cual las manchas de inundación diarias se sumaron para generar tres mapas de inundación: Enero – Abril, Mayo – Agosto y Septiembre – Diciembre.

En la Figura No 5.12 se muestra la forma en que se sumaron los mapas de manchas de inundación diarios. En primer lugar se sumaron las manchas de todos los días de un mismo mes (01 de enero de 1994 a 31 de enero de 1994) dando lugar al mapa de mancha de inundación de Enero de 1994, en este mapa el valor de cada celda representa el número de días que este terreno de 20 x 20 m estuvo inundado durante el período de tiempo en consideración (0 a 31 días). Este procedimiento se aplicó para cada uno de los meses desde enero de 1994 hasta diciembre de 1996.

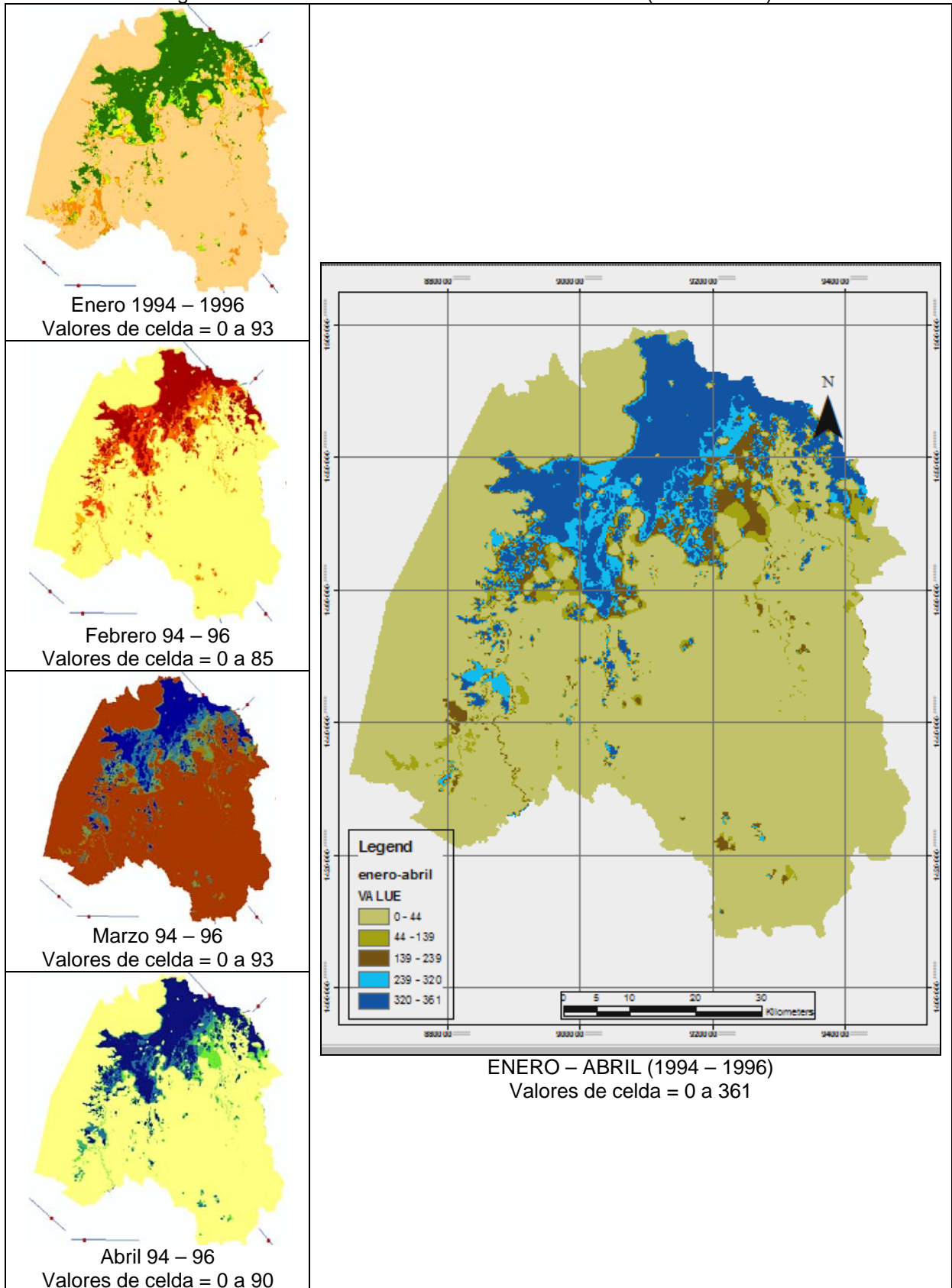
Seguidamente se sumaron los tres mapas del mismo mes en los años analizados: Enero de 1994, Enero de 1995 y Enero de 1996. Como resultado se obtiene un mapa de manchas de inundación para el mes de Enero con valores de celda entre 0 y 93 días.

Figura No 5.12. Suma de niveles medios diarios en cada celda



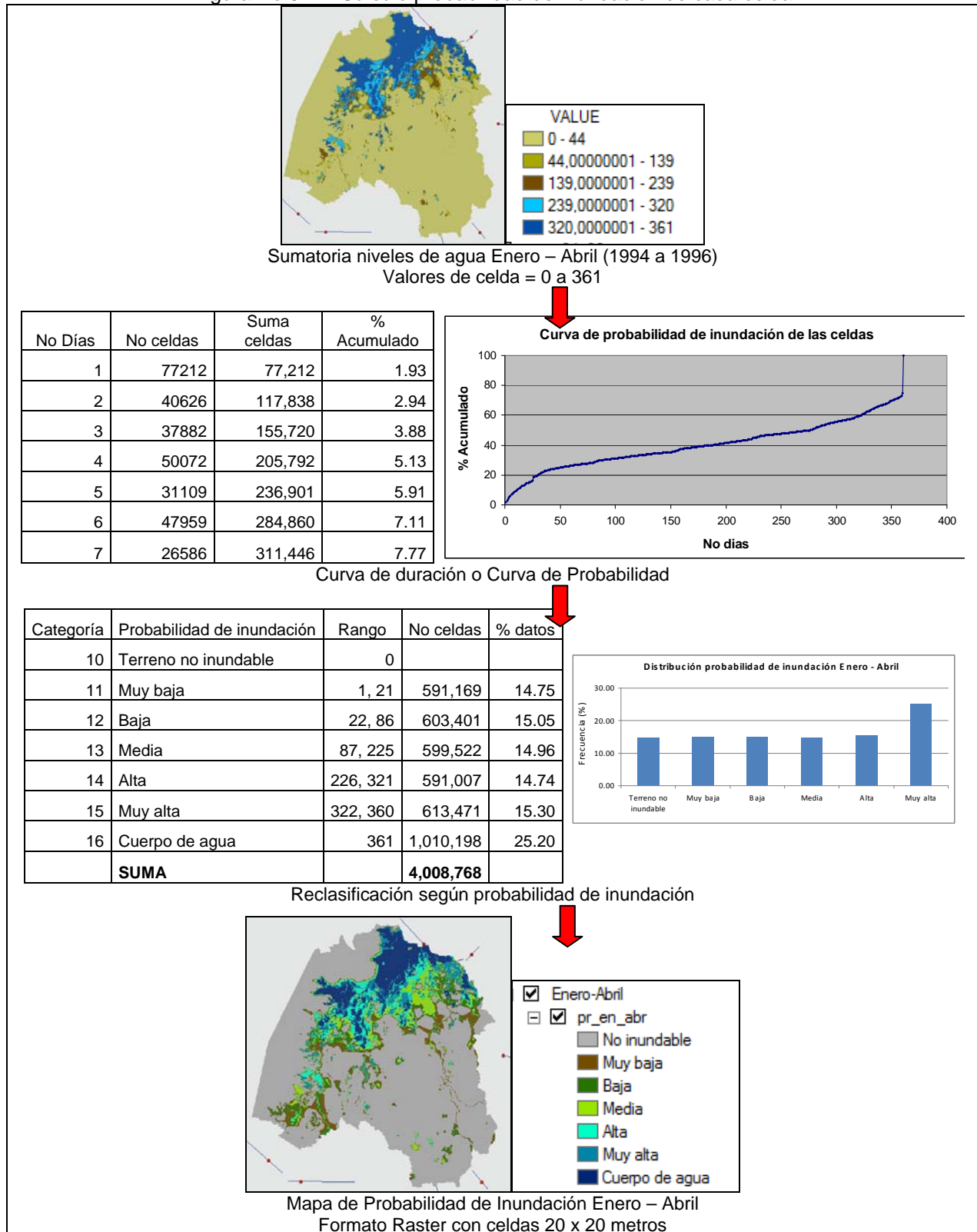
Finalmente, de acuerdo con la relación encontrada entre el ciclo hidrológico y los usos del suelo se sumaron las manchas de inundación de los cuatro meses que constituyen un período hidrológico. En la Figura No 5.13 se muestra la construcción de la mancha de inundación del primer período comprendido entre Enero y Abril. En este mapa las celdas tienen valores entre 0 y 361, donde 0 corresponde al terreno que nunca fue inundado y 361 el terreno con presencia permanente de agua, es decir ríos y ciénagas permanentes.

Figura No 5.13. Manchas de inundación Enero - Abril (1994 a 1996)



5.3.2.6 Cálculo probabilidad de inundación

Figura No 5.14. Cálculo probabilidad de inundación de cada celda



Para generar los mapas de probabilidad de inundación se reclasificaron los tres mapas de inundación (ver Figura No 5.13). La probabilidad de inundación de cada celda se estimó a través de una curva de duración de niveles, tal como se describe a continuación:

De ArcGis se obtuvo para cada celda el número de días que estuvo cubierta por agua, estos valores fueron ordenados de menor a mayor, se sumaron y se calculó el porcentaje respecto al número total de celdas inundadas, tal como se muestra en Tabla No 5-6.

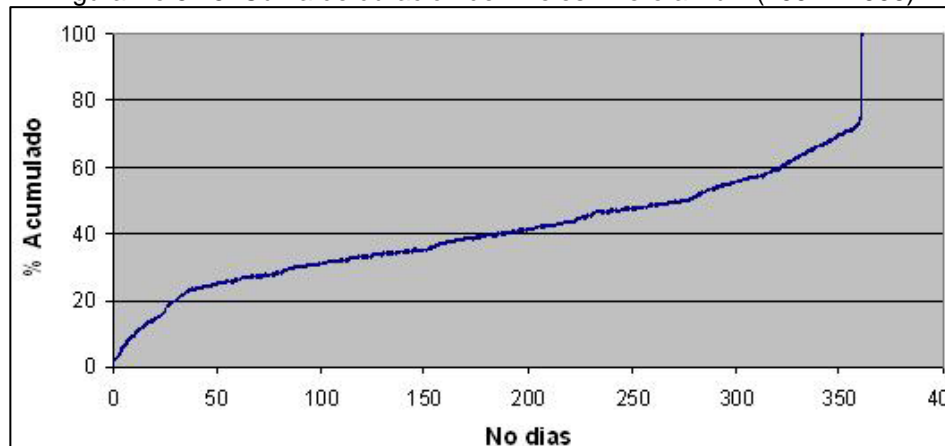
Tabla No 5-6. Construcción curva de duración de niveles Enero a Abril (1994 – 1996)

No Días	No celdas	Suma celdas	% Acumulado
1	77212	77,212	1.93
2	40626	117,838	2.94
3	37882	155,720	3.88
4	50072	205,792	5.13
5	31109	236,901	5.91
6	47959	284,860	7.11
7	26586	311,446	7.77
8	23684	335,130	8.36
9	20254	355,384	8.87
10	27067	382,451	9.54
...
357	11754	2,879,223	71.82
358	20224	2,899,447	72.33
359	28085	2,927,532	73.03
360	71038	2,998,570	74.80
361	1010198	4,008,768	100.00

$$\% \text{acumulado} = \frac{236.901}{4.008.768} * 100 = 5,91\%$$

En la Figura No 5.15 se muestra la Curva de Duración de Niveles para el período enero a abril, en esta curva se puede observar que un porcentaje importante de celdas permanecen inundadas 361 días las cuales corresponden a los cuerpos de agua permanentes, que representan un área total de 160.350 ha (25,2%).

Figura No 5.15. Curva de duración de niveles Enero a Abril (1994 - 1996)

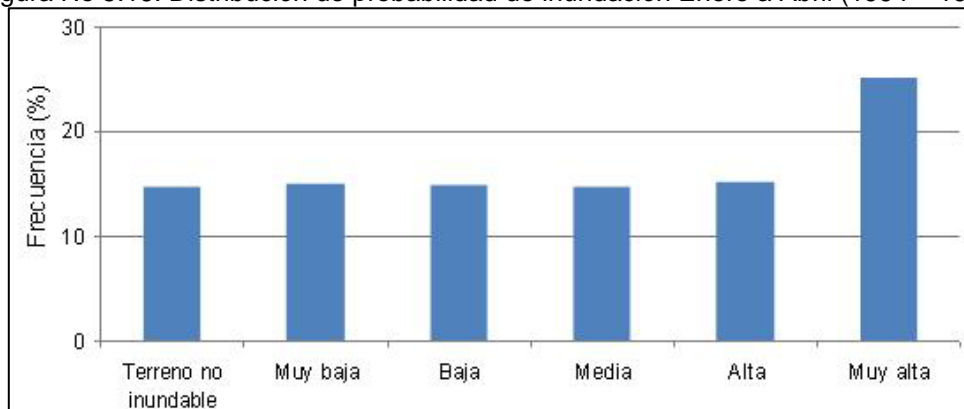


Con la información tabulada se procedió a reclasificar el número de días de inundación calculando la probabilidad de inundación para siete categorías:

- Terreno no inundable
- Probabilidad de inundación muy baja
- Probabilidad de inundación baja
- Probabilidad de inundación media
- Probabilidad de inundación alta
- Probabilidad de inundación muy alta
- Cuerpo de agua

El número de celdas por categoría se definió buscando que cada categoría quedara conformada aproximadamente por el 20% de los datos, lo cual permite una mejor distribución y mejor visualización del mapa de probabilidades (ver Figura No 5.16).

Figura No 5.16. Distribución de probabilidad de inundación Enero a Abril (1994 – 1996)



Como resultado se obtuvieron tres mapas de probabilidad de inundación los cuales hacen parte del Automata Celular (ver Figura No 5.14).

5.3.3 Otras aproximaciones a la modelación hidrodinámica de La Mojana

La dinámica del sistema hídrico y su respuesta ante cambios en la red de drenaje son de especial importancia para un modelo de gestión del agua y los usos del suelo en La Mojana, y aunque con antelación a esta investigación se han realizado algunos ejercicios de modelación, la disponibilidad de datos que permitan su adecuada implementación es escasa, tal como ocurre con la inexistencia de registros de caudal.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, en esta investigación se evaluaron distintas alternativas de modelación y se avanzó en la implementación de un modelo hidráulico utilizando el software River 2D, con el propósito de identificar los parámetros necesarios para modelar este complejo sistema hídrico y así orientar a las instituciones interesadas sobre una posible ruta de trabajo.

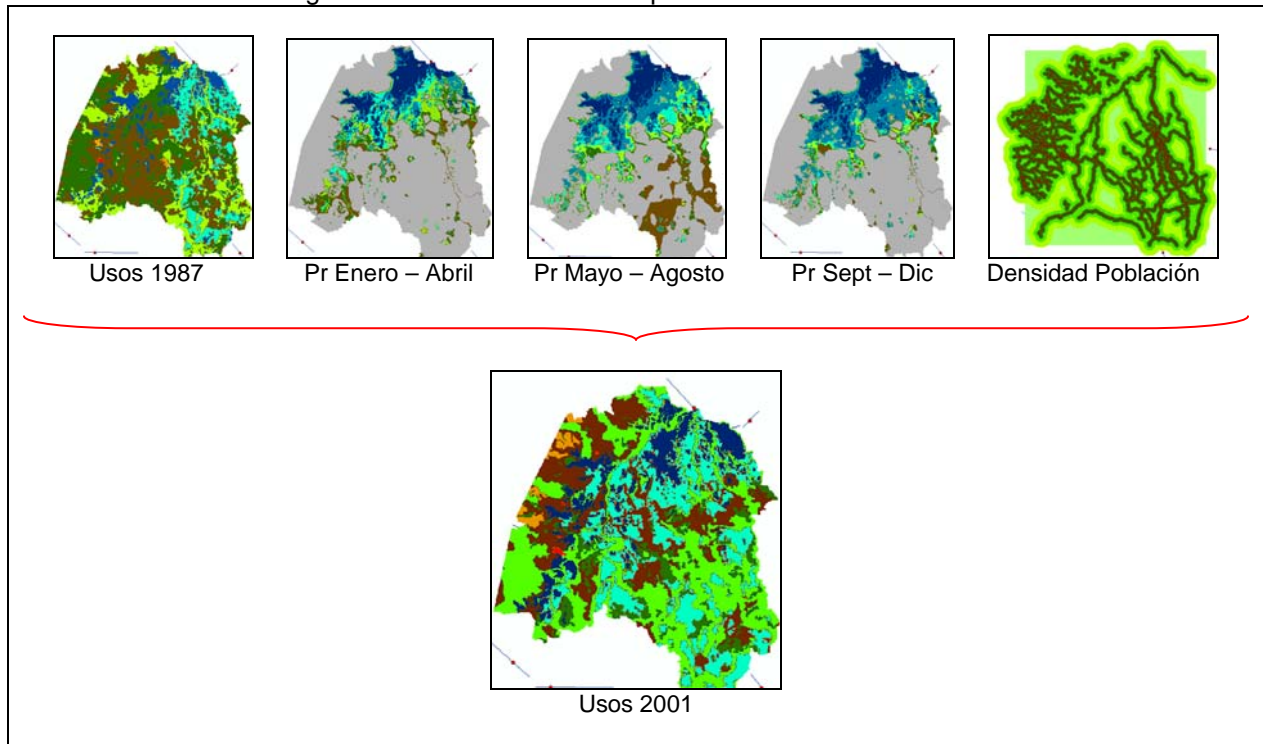
5.4 MODELO AUTOMATA CELULAR

5.4.1 Formulación del Automata Celular

Uno de los productos de la investigación es el diseño e implementación de un modelo de prospección para simular la dinámica de usos del suelo en La Mojana, para lo cual se utilizaron Automatas Celulares.

El Automata Celular realiza la prospección de usos del suelo a partir de un mapa de usos del suelo (condición inicial) y de mapas de probabilidad de inundación (Pr) y densidad de población (ver Figura No 5.17).

Figura No 5.17. Variables incorporadas al Automata Celular



La estimación de usos futuros es función de la diferencia temporal entre los dos mapas de usos del suelo con que se construyen las reglas, en este caso 1987 y 2001, en consecuencia el pronóstico se realiza cada 14 años. Este Δt de 14 años es determinado por la existencia de solo dos mapas de la variable usos del suelo. La tendencia lineal resultante entre los usos del suelo (1987 - 2001) puede ser modificada por otro tipo de tendencia en la medida que se cuente con más imágenes satelitales de esta variable, así mismo sería conveniente reducir el Δt de 14 años, para lo cual se requieren más imágenes satelitales recientes.

Una característica importante del autómata diseñado es que los datos deben ordenarse en forma matricial por filas y columnas y no admite celdas con datos no conocidos, por lo cual fue necesario recortar el área de aplicación del modelo a un rectángulo de 52.600 x 52.900 m, de manera que cada mapa cuenta con 6'961.626 celdas de 20 x 20 m. En consideración al tiempo necesario para procesar esta información se realizó una prueba del autómata en un área menor de 3.500 x3.000 m, con lo cual cada mapa cuenta con solo 26.576 celdas. En la Figura No 5.18 se presentan los límites rectangulares descritos.