



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 03 de abril de 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Neiva

Los suscritos:

KAREN YISETH PERDOMO QUESADA _____, con C.C. No. 1.080.296.537 _____,

PAOLA POLANIA PEREZ _____, con C.C. No. 1.075.311.083 _____,

autores del trabajo de grado titulado **DINAMICA PARA LA SOSTENIBILIDAD Y RESILIENCIA DEL HUMEDAL “LOS COLORES”, UN APOORTE HACIENDO USO DE LOS AUTOMATAS CELULARES** presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de MATEMATICO

Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

KAREN YISETH PERDOMO QUESADA:

Firma: Karen Perdomo-Q.

PAOLA POLANIA PEREZ:

Firma: 



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
PERDOMO QUESADA	KAREN YISETH
POLANIA PEREZ	PAOLA

DIRECTOR

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VERA CUENCA	JASMIDT

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: MATEMATICO

FACULTAD: CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA : MATEMATICA APLICADA

CIUDAD: NEIVA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2019

NÚMERO DE PÁGINAS: 81

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___
Tablas o Cuadros___

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. MODELO	MODEL
2. DINÁMICA	DYNAMIC
3. AUTÓMATAS	AUTOMATON
4. ENTROPIA	ENTROPY
5. COBERTURA	COVERAGE



RESUMEN DEL CONTENIDO:

El proyecto de grado presentado es el desarrollo de un modelo matemático y computacional utilizando los autómatas celulares, de manera que permite observar la dinámica del cambio de la cobertura del complejo de humedales ubicado en el oriente de la ciudad de Neiva; utilizando aerofotografías de los años 1960,1970,1988,2006,2014 de dicha zona.

Dichos mapas son procesados en el software ArcGIS versión 10.4.1 con el fin de exportar la información a Excel y luego ser leída en MATLAB, para realizar la construcción de cada uno de los elementos del autómata celular y las reglas de evolución que son creadas y debidamente analizadas con el software WEKA.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The project of degree presented is the development of a mathematical and computational model using cellular automata, in order to observe the dynamics of the change in the coverage of the wetland complex located in the east of the city of Neiva; using aerial photographs of the years 1960,1970,1988,2006,2014 of said area.

These maps are processed in the software ArcGIS version 10.4.1 in order to export the information to Excel and then be read in MATLAB, to perform the construction of each of the elements of the cellular automaton and the evolution rules that are created and duly analyzed with the WEKA software.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: *Jamidt Vera Cuenca*

Firma: *Jamidt Vera C*

Nombre Jurado: *Mario Montalegre Corderas*

Firma: *Mario Montalegre C*

Nombre Jurado: *Edinson Asprado Delgado Rivas*

Firma: *Asprado*

DINÁMICA PARA LA SOSTENIBILIDAD Y RESILIENCIA DEL HUMEDAL
“LOS COLORES”, UN APORTE HACIENDO USO DE LOS AUTOMATAS
CELULARES

PRESENTADO POR:
PERDOMO QUESADA KAREN YISETH
Código:20141125289
POLANIA PEREZ PAOLA
Código:20141125272

DIRECTOR DEL PROYECTO:

Jasmidt Vera Cuenca



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
MATEMATICA APLICADA
Neiva, 2019

DINÁMICA PARA LA SOSTENIBILIDAD Y RESILIENCIA DEL HUMEDAL
“LOS COLORES”, UN APORTE HACIENDO USO DE LOS AUTOMATAS
CELULARES

Trabajo de grado para optar el título de Matemático

PRESENTADO POR:
PERDOMO QUESADA KAREN YISETH
Código:20141125289
POLANIA PEREZ PAOLA
Código:20141125272

DIRECTOR DEL PROYECTO:

Jasmidt Vera Cuenca



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
MATEMATICA APLICADA
Neiva, 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios y a nuestros ángeles en el cielo por darnos la vida y la salud para hacer posible esta etapa, a nuestras familias por su compañía y apoyo, a los profesores Nelson Obregón Neira y Ana Carolina Santos Rocha quienes con sus conocimientos hicieron posible la consolidación de nuestro trabajo; a la profesora Jasmidt Vera Cuenca y al profesor Mauro Montealegre Cárdenas por su colaboración.

A la vicerrectoría de investigación y proyección social de la Universidad Surcolombiana por participar como financiadores del proyecto, al Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana por brindarnos un espacio en sus instalaciones, a la profesora Leyla Marleny Rincón por brindarnos la información para el desarrollo del proyecto, al ingeniero Manuel Fernando Ovalle por su enseñanza y colaboración en la programación requerida para este proyecto.

Por último, a todos nuestros compañeros que nos brindaron una voz de aliento y nos aportaron en el fortalecimiento de nuestra investigación con ideas y críticas constructivas.

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
OBJETIVOS	4
Objetivo General	4
Objetivos Especificos	4
1. ASPECTOS CONCEPTUALES	5
1.1. Humedales e importancia de estudiar sostenibilidad y resiliencia con los AC	5
1.2. Autómatas celulares	7
1.2.1. Historia de los ACs	8
1.2.2. Definición de los elementos de los autómatas celulares .	10
1.2.2.1. Lattice	11
1.2.2.2. Celda, Estados de celda y Configuración Inicial	12
1.2.2.3. Vecindad	12
1.2.2.4. Reloj virtual de computo	13
1.2.2.5. Reglas de transición	13
1.2.2.6. Condiciones de frontera	14
1.2.2.7. Comportamiento	15
1.3. Minería de datos	17

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	25
3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	27
3.1. Reclasificación de imágenes disponibles	27
3.2. Construcción de la tabla de patrones	41
3.3. Construcción de las reglas del AC utilizando minería de datos	43
4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	53
4.1. Construcción matemática de los elementos del modelo de AC .	53
4.1.1. Definición del plano o lattice	53
4.1.2. Vecindad	53
4.1.3. Estados de celda y configuración inicial	54
4.1.4. Reglas de transición	54
4.1.5. Construcción de herramienta computacional	55
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
CONCLUSIONES	66
TRABAJO FUTURO	67
Bibliografía	68
ANEXOS	72

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas son conjuntos formados por seres bióticos, abióticos y su fuerte interacción; son entornos ricos en biodiversidad, espacios que aportan en el crecimiento y el libre desarrollo del hombre. Dentro de estos, se encuentran los humedales que son uno de los medios más productivos del planeta, al ser nichos de diversidad biológica y de recursos hídricos esenciales para la supervivencia humana.

En nuestra región La Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena(CAM), posee un inventario de aproximadamente 230 humedales distribuidos a lo largo del departamento del Huila, de los cuales 169 fueron priorizados para su estudio y análisis; En el casco urbano de la ciudad de Neiva se encuentran ubicados dos ecosistemas de humedales, conocidos como el pulmón verde de la ciudad, los cuales son: El jardín Botánico y el complejo de humedales del oriente de la ciudad.

Hoy en día, los ecosistemas se están viendo gravemente afectados por las distintas acciones cotidianas del ser humano, que destruyen cada uno de sus componentes. Por otro lado, el cambio climático también ha degradado las fuentes hídricas acabando estos maravillosos lugares. Se puede considerar que el deterioro en los ecosistemas es la mayor problemática que se debe afrontar en la actualidad; en particular, la degradación del complejo de humedales del oriente de la ciudad de Neiva, debido a las afectaciones del cambio climático y aún más al crecimiento no controlado de las urbanizaciones cercanas a

dicha zona.

Una forma de estudiar las consecuencias negativas de los ecosistemas es a través del uso de modelos matemáticos apoyado en evolución espacial como los autómatas celulares(AC), un AC son sistemas dinámicos donde el tiempo y el espacio son discretos y están compuestos por un conjunto de celdas elementales homogéneas ordenadas en una malla regular espacial de n-dimensiones (Wolfram,2002). Según Packard y Wolfram (1985), los ACs son una simple idealización matemática de los sistemas naturales, inspirados en la observación del comportamiento colectivo de muchos de los sistemas naturales. Los estados pueden ser alterados de un instante a otro en unidades de tiempo discreto, es decir, que se pueden cuantificar con valores enteros a intervalos regulares. De esta manera este conjunto de células logra una evolución según una determinada expresión matemática, que es sensible a los estados de las células vecinas, la cual se le conoce como regla de transición local, además se pueden ver como un modelo discreto de ecuaciones diferenciales, en cualquier momento los ACs son convenientes para describir matemáticamente modelos de sistemas utilizando sus componentes simples para formar estructuras complejas.

Por tanto, la presente investigación busca encontrar un modelo matemático y computacional haciendo uso de la herramienta de Autómatas Celulares que permita simular la dinámica en cuanto al cambio de cobertura del complejo de humedales ubicado en el oriente de la ciudad de Neiva, para que en un trabajo futuro se pueda analizar la sostenibilidad y la resiliencia de dicho complejo de humedales.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según lo escrito anteriormente, hacemos uso de la herramienta de autómatas celulares, con el fin de estudiar la dinámica en cuanto al cambio de cobertura del complejo de humedales ubicado en el oriente de la ciudad de Neiva, ya que estos permiten estudiar los cambios y comportamientos de distintos fenómenos.

Por tanto, nuestra pregunta de investigación es:

¿Cómo ha sido la dinámica en cuanto al cambio de cobertura del complejo de humedales ubicado en el oriente de la ciudad de Neiva y como esta ha afectado la sostenibilidad y resiliencia de dicho humedal?

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar un modelo matemático y computacional utilizando los autómatas celulares, de manera que permita observar la dinámica del cambio de la cobertura del complejo de humedales ubicado en el oriente de la ciudad de Neiva.

Objetivos Especificos

- Identificar por medio de aerofotografías clasificadas los cambios de cobertura que ha tenido a través del tiempo el complejo de humedales ubicado en el oriente de la ciudad de Neiva.
- Construir un modelo matemático haciendo uso de autómatas celulares que permita observar el cambio de la cobertura del complejo de humedales y ejecutarlo en el software MATLAB.
- Interpretar los resultados que genera la reproducción del modelo de autómatata celular.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS CONCEPTUALES

En este capítulo se presentan la descripción de humedales y su clasificación, las bases teóricas de los autómatas celulares, su historia y elementos que lo componen.

1.1. Humedales e importancia de estudiar sostenibilidad y resiliencia con los AC

Los humedales son espacios que aportan una gran cantidad de beneficios en el desarrollo del ser humano, para su protección y cuidado en 1971 se creó la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, más conocida como la Convención Ramsar el cual es un tratado intergubernamental cuya misión es *“la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo”*.

Los humedales que según la convención Ramsar(1971) son: *“extensiones de marismas, pantanos, turberas, cuerpos de agua de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas, corrientes, dulces, salobres y saladas*

1.1 Humedales e importancia de estudiar sostenibilidad y resiliencia con los AC 6

incluyendo las áreas de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros”, se clasifican en cinco tipos:

- Marinos, humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral.
- Estuarinos, incluidos deltas, marismas de marea y manglares.
- Lacustres, humedales asociados con lagos.
- Ribereños, humedales adyacentes a ríos y arroyos.
- Palustres, es decir, “pantanosos” - marismas, pantanos y ciénagas.

Además, hay humedales artificiales, como estanques de cría de peces y camarones, estanques de granjas, tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales (Ramsar,1971).

Una de las características más importantes de un humedal es su capacidad para mantener vegetación acuática flotante o sumergida. Cualquier humedal provee uno de los hábitats que ofrecen más beneficios para las plantas y los animales ya que en su área alberga una alta concentración de organismos. Por otra parte, la flora distintiva de los humedales está representada por pastos marinos, lirios acuáticos y árboles de arce, ciprés, entre otros, son plantas acuáticas, sumergidas y flotantes, así como árboles que soportan los terrenos húmedos.

Análogamente, la sostenibilidad en el ámbito ambiental es el equilibrio que se genera entre la sociedad y la naturaleza, esto implica lograr resultados de desarrollo sin destruir las fuentes de nuestros recursos naturales, creando una conciencia global de la protección del medio ambiente, donde cada uno de nosotros como beneficiarios de un medio ambiente sano debemos de responsabilizarnos del cuidado y uso racional de los recursos naturales. En este sentido es importante tratar sobre la sostenibilidad de los humedales a raíz de que son ecosistemas fundamentales en el desarrollo sostenible, manteniendo el equilibrio medioambiental y regulando de forma natural el ciclo del agua.

Hoy en día es importante enmendar los daños causados en un sistema ambiental, es por ello que es necesario tener en cuenta el concepto de resiliencia para tratar el tema de sostenibilidad, ya que la resiliencia es la capacidad de recuperación de un sistema, es decir, contribuye a mantener el equilibrio medioambiental. Por lo tanto, la resiliencia según (Masten y Powell, 2003) se refiere a «patrones de adaptación positiva en el contexto de riesgos o adversidades significativas» en el caso de los humedales, los riesgos hacen referencia a todas las afectaciones que sufren dichos ecosistemas por causa del cambio climático, desarrollo urbano mal planificado y contaminación de las fuentes hídricas.

Los humedales también se pueden ver como sistemas complejos adaptativos, sus características más importantes son:

- 1. Presentan dinámicas no lineales que implican entender la presencia de umbrales de cambio-incertidumbre, y procesos de retroalimentación.*
- 2. Tienen propiedades emergentes.*
- 3. Sus dinámicas están marcadas por jerarquías a múltiples escalas que pueden funcionar desde las superiores hasta las inferiores, pero también, al contrario.*
- 4. Cuentan con capacidad de auto-organización (son adaptativos) y, por lo tanto, su capacidad de resiliencia, es el atributo que permite absorber el cambio y adaptarse (Liu et al. 2007).*

Es por ello que los Autómata Celulares son una herramienta fundamental para modelar fenómenos naturales por lo que estos cuentan con componentes que se relacionan localmente unos con otros y presentan características de los AC como lo son el comportamiento emergente, la auto-organización y más su gran uso como sistemas dinámicos adaptados a diferentes circunstancias.

1.2. Autómatas celulares

En las ciencias el estudio de los sistemas dinámicos es un tema esencial ya que son sistemas complejos utilizados para representar modelos de la naturaleza por lo que la evolución del sistema se da a través del tiempo el cual puede ser discreto o continuo. En nuestro trabajo hacemos uso de los sistemas

dinámicos discretos, pues una manera de representarlos son los autómatas celulares donde cada celda que compone los ACs están determinado por estados en el cual cada uno cambia de un instante a otro de acuerdo a un conjunto de reglas de transición comunes a todas las celdas.

1.2.1. Historia de los ACs

Una de las herramientas matemáticas que permiten desarrollar modelos espaciales son los autómatas celulares (AC) que fueron diseñados por Von Neuman y Stanislaw Ulam en los años 40. Ulam, le propone a von Neumann el problema de construir un “universo abstracto” presentando un marco teórico para el estudio de problemas provenientes de sistemas con comportamientos complejos y descritos por reglas sencillas. Mediante el cual Von Neuman intentaba modelar una máquina que fuera capaz de auto-replicarse, llegando así a un modelo matemático de dicha maquina con reglas complicadas sobre una red rectangular.

Para su objetivo Von Neumann utilizó un autómata con 29 estados posibles y cuyas vecindades que considero fueron las cuatro celdas adyacentes que comparten un borde con la celda central. Donde el estado de la celda central iría cambiando a medida que pasa el tiempo (caso discreto) teniendo en cuenta el estado de sus cuatro vecinas adyacentes. Inicialmente los ACs fueron interpretados como conjunto de células que crecían, se reproducían y morían a medida que pasaba el tiempo. El nombre de los ACs se debe a la similitud con el crecimiento de las células.

De manera que, la idea central que gobierna la modelación con AC, es la reproducción de patrones de observaciones de un sistema complejo mediante el uso de reglas simples, capaces de modelar un comportamiento global consecuencia de las interacciones entre estas mismas reglas (Ilachinski, 2001 y Weimar, 1997). Razón por la cual este modelo matemático ha permitido modelar distintos procesos físicos, económicos, sociales; cuyo comportamiento se suscribe a una vecindad y puede interrelacionarse con otros entornos por medio de funciones de transición; estas funciones en cada entorno geográfico simulado con autómatas celulares, muestran un comportamiento emergente, auto-organizado y adaptativo; produciendo modelos complejos aplicando reglas simples.

Es decir, son capaces de reproducir fenómenos que muestran complejidad desde el punto de vista de dinámicas determinísticas no lineales, pudiendo simular algunos procesos de cambio de los más recientes y sorprendentes (Almeida et al, 2003). Según, White y Engelen (2000) presentan de manera sintética las ventajas de estos modelos en los siguientes puntos:

1. *Son inherentemente espaciales, al estar típicamente definidos para una malla ráster, y se pueden compatibilizar con datos geográficos existentes.*
2. *Son dinámicos y pueden representar procesos espaciales de forma directa.*
3. *Son adaptables a un amplio rango de situaciones.*
4. *Son simples, lo que equivale a una gran facilidad de cálculo.*
5. *Están basados en un conjunto de reglas, que pueden reflejar un elevado número de comportamientos espaciales.*
6. *A pesar de su simplicidad pueden exhibir comportamientos extraordinariamente ricos.*

En 1970 el matemático John Horton Conway publicó un juego matemático denominado el “Juego de la vida” el cual es uno de los ACs más destacados; cuya idea era trabajar en dos dimensiones tomando las ocho vecindades que rodean a la celda central; es decir considerando la vecindad tipo Moore, donde cada celda puede presentar dos estados posibles: vivo o muerto, los cuales dependen de un conjunto de reglas debidamente definidas las cuales se modifican con el paso del tiempo (figura 1.1) las reglas que rigen este juego son:

- **Nacimiento:** Si una célula muerta tiene exactamente tres vecinas vivas, estas se reproducen y le dan vida.
- **Supervivencia:** Si una célula viva tiene dos o tres vecinas vivas, ella permanece viva; pero si hay menos de dos vecinas vivas, muere por aislamiento.
- **Muerte:** Si una célula tiene más de tres vecinas vivas, muere por superpoblación si estaba viva, y permanece muerta si ya lo estaba.

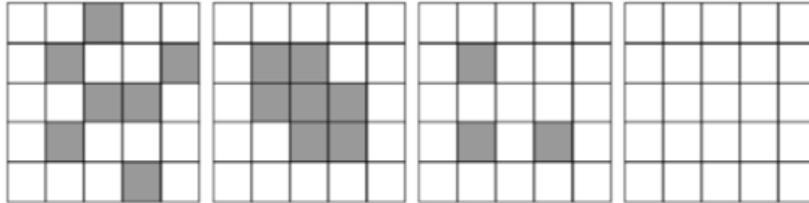


Figura 1.1: Ejemplo del “juego de la vida” propuesto por Jhon Conway
Fuente: Muñoz, 2013

Stephen Wolfram en la década de los ochenta del siglo XX, señaló que los patrones complejos son generados por reglas sencillas y componentes muy simples; por esta razón implementa los autómatas celulares en sus trabajos, enfocado en analizar los comportamientos característicos de los AC, identificando cuatro grupos básicos para los autómatas unidimensionales según su comportamiento espacio-temporal. De igual forma se destaca el trabajo de Stephen Wolfram sobre la Teoría Computacional de los Autómatas Celulares.

Wolfram hace uso de las ideas del primer ejemplo de Von Neumann estudiando los autómatas unidimensionales admitiendo que cada célula toma dos estados 0 y 1. Donde la evolución del estado de cada célula depende del estado de dicha célula y el de sus vecinas contiguas regidas por unas reglas, donde Wolfram considero las 256 posibles reglas bajo tales consideraciones; muchas de ellas conocidas en la actualidad por la numeración asignada por Wolfram. En muchas de estas reglas se pueden observar “fenómenos complejos” o “caóticos”.

1.2.2. Definición de los elementos de los autómatas celulares

Los ACs pueden definirse con los siguientes elementos básicos (Karafyllidis y Thanailakis, 1997 y Muñoz, 1996):

- Un plano o espacio n - dimensional, dividido en un número de subespacios homogéneos, conocidos como células o celdas.
- La geometría de celda, cada celda puede estar en uno de un conjunto finito o numerable de estados.

- Una Configuración, la que consiste en asignarle un estado a cada celda del autómata.
- Una Vecindad definida para cada celda, que consiste en un conjunto contiguo de celdas, indicando sus posiciones relativas respecto a la celda misma.
- Una Regla de evolución, la cual define cómo debe cada celda cambiar de estado, dependiendo del estado inmediatamente anterior de su vecindad.
- Un “Reloj virtual” de cómputo conectado a cada celda del autómata, el cual generará pulsos simultáneos a todas las celdas indicando que debe aplicarse la regla de evolución y de esta forma cada celda cambiará de estado.

1.2.2.1. Lattice

La lattice asigna el plano o el espacio n-dimensional de evolución del AC compuesto por un conjunto de celdas donde la geometría de está depende de la geometría de las celdas. En un AC unidimensional, el espacio solo puede ser lineal. Un AC bidimensional, pueden tener diferentes tipos de geometría de celda como: triangular, hexagonal o rectangular (figura 1.2).

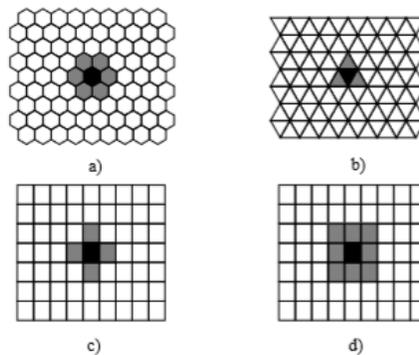


Figura 1.2: Algunas lattice, celdas y vecindades para autómatas celulares bidimensionales a) Celda hexagonal, b) Celda triangular, c) Celda rectangular con vecindad Von Neumann, d) Celda rectangular con vecindad Moore.

Fuente: Santos,2010.

1.2.2.2. Celda, Estados de celda y Configuración Inicial

Las celdas componen la lattice del AC donde cada una de ellas debe ser similares, distribuidas en un espacio n-dimensional discreto, es decir, lineal, bidimensional o tridimensional, el cual depende del fenómeno a modelar; donde se le asigna un elemento de un conjunto finito no vacío denominado conjunto de estados.

El conjunto de estados es finito y cada elemento o célula del lattice toma un valor de este conjunto; el valor puede ser un número o una propiedad, el estado de una celda cambia de un instante a otro seguido de un conjunto de reglas de transición definidas en todas las celdas.

La configuración inicial consistente en la distribución de estados de cada celda del autómata en t_0 .

1.2.2.3. Vecindad

La vecindad define el conjunto de contiguo de células y posición relativa respecto a cada una de ellas. En los ACs de 2-dimensiones las vecindades más comunes son la de Von Neumann que considera cuatro celdas adyacentes que comparten un borde con la celda central y la de Moore que considera las ocho celdas circundantes respecto a la celda central, en la (figura 1.3). se consideran las vecindades definidas en los ACs de 2-dimensiones.

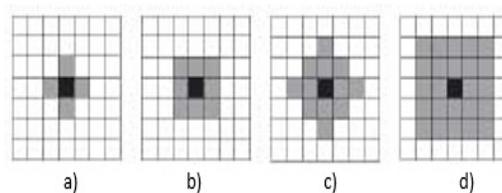


Figura 1.3: Vecindades definidas en los ACs de 2-dimensiones. a) Von Neumann con radio 1, b) Moore con radio 1, c) Von Neumann con radio 2, d) Moore con radio 2.

Fuente: Chen 2004 y Jiménez et.al., 2000.

1.2.2.4. Reloj virtual de computo

El reloj virtual de computo permite evaluar el tiempo de las reglas de evolución en que cada célula cambia de un estado a otro, debido a que la evolución del autómata se ejecuta mediante una discretización temporal, la conexión de dicho reloj se ejecuta de forma paralela (Hugo franco,2010), como se observar en la (figura 1.4) .

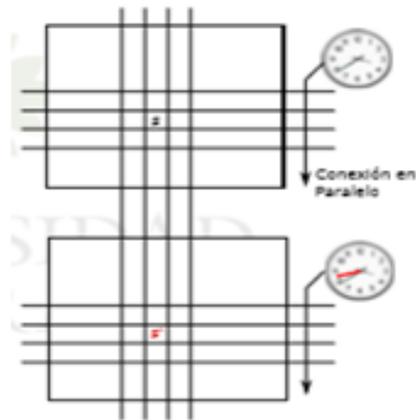


Figura 1.4: Conexión del reloj de computo.
Fuente: Hugo Franco, 2010.

1.2.2.5. Reglas de transición

Las reglas de transición definen como cada celda cambia de estado en un tiempo siguiente, teniendo en cuenta el estado de la celda y el de sus vecinas en el tiempo inmediatamente anterior. Estas reglas se definen de forma explícita facilitando la aplicación en el fenómeno a modelar, para la creación de estas reglas se puede implementar el uso de expresiones matemáticas como: el vecino más cercano, funciones de decaimiento, parámetros matriciales, ecuaciones de evaluación multicriterio (EMC), modelos aplicando lógica, lógica difusa o redes neuronales (Santos,2010).

También para la construcción de las reglas de transición se utiliza la minería de datos, una de las técnicas más utilizadas es la implementación de árboles de decisión mediante software estadísticos.

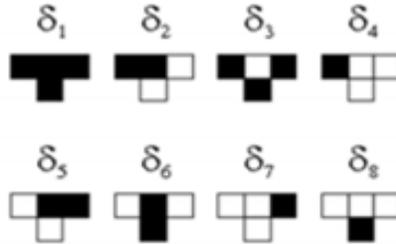


Figura 1.5: Reglas de transición.
Fuente: Figueroa y Garay, 2015.

Las reglas de transición pueden ser definidas de la siguiente manera (Weimar 1997):

- Reglas Determinísticas: En las reglas de este tipo el estado de la celda no es determinado por función de probabilidad. El estado de la celda queda determinado por el estado de sus vecinas. Un ejemplo de este tipo de regla es el “juego de la vida” (Gardner, 1970), en que el estado de una celda queda definido si un determinado número de celdas vecinas se encuentran en un estado específico.
- Reglas Probabilísticas: Este tipo de regla se produce cuando una función entrega uno ó más estados con cierta probabilidad, considerando que la suma de probabilidades de todos los estados posibles es 1. De esta forma, los AC se convierten en procesos estocásticos en tiempo discreto.

De igual manera los AC pueden ser calibrados simultáneamente durante la construcción de las reglas de transición mediante el proceso de minería de datos (Santos, 2010). De esta manera para la construcción de las reglas de transición se debe tener en cuenta la geometría de la malla, la vecindad y el conjunto de estados posibles; este proceso de construcción de las reglas de transición es totalmente intuitivo, es decir, depende de los conocimientos del modelador acerca del fenómeno a modelar.

1.2.2.6. Condiciones de frontera

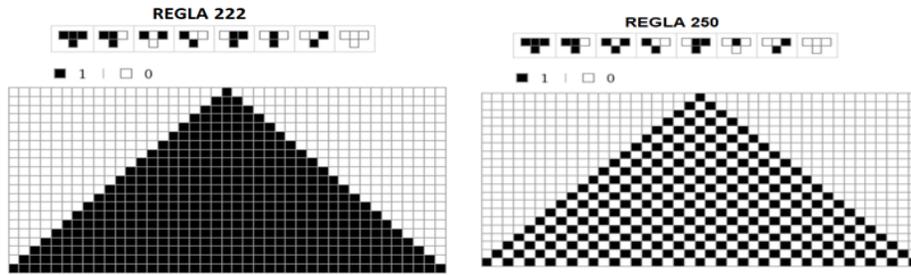
Las condiciones de frontera hacen referencia a que sucede en las celdas que tocan los bordes de la lattice, las cuales se clasifican en:

- **Frontera reflectora:** las células fuera de la lattice del autómata toman los valores de las que se encuentran dentro de la lattice. De este modo una célula que estuviera junto al borde de la lattice (fuera de ella) tomaría como valor el de la célula que esté junto al borde de la lattice, dentro de ella.
- **Frontera abierta:** se establece que todas las células fuera de la lattice del autómata toman un valor fijo. Una frontera se dice fría si las células fuera de la frontera se consideran inactivas, y calientes si se asumen como activadas.
- **Frontera periódica:** las células que están en la frontera interactúan con sus vecinos inmediatos y con las células que están en el extremo opuesto de la lattice. En una lattice de dos-dimensiones se podría visualizarse como un toroide.
- **Sin frontera:** la lattice comienza con un tamaño definido y finito, y conforme se requiera va creciendo en el tiempo, para que las células interactúen con las que se encuentran fuera de la lattice.

1.2.2.7. Comportamiento

Los autómatas celulares se clasifican de acuerdo a su comportamiento, según Wolfram existen cuatro clases para los autómatas unidimensionales. Donde el color negro representa el estado 1 y el color blanco representa el estado 0 y la evolución que presenta el autómata celular se observa según las filas establecidas: **Clase I: Estado Final Homogéneo.** Son comportamientos que tienden a un estado estable y homogéneo. Cualquier aleatoriedad desaparece, ver (figura 1.6a).

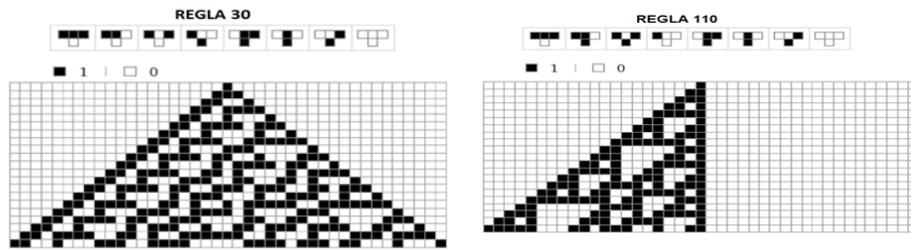
Clase II: Estado Final Periódico. En su comportamiento evolucionan rápidamente hacia estructuras estables u oscilantes; Aquí, parte de la aleatoriedad puede permanecer, ver (figura 1.6b). **Clase III: Evolución Caótica.** En su comportamiento evolucionan de forma pseudo—aleatoria o caótica. Las estructuras estables que aparecen son destruidas rápidamente por pequeños cambios, ver (figura 1.7a). **Clase IV: Estructuras Complejas.** En su comportamiento evolucionan en las estructuras que interactúan de manera compleja e interesante, con la formación de las estructuras locales que son capaces de sobrevivir por largos períodos de tiempo, ver (figura 1.7b).



(a) Comportamiento Clase I
Fuente: Wolfram, 2002.

(b) Comportamiento Clase II
Fuente: Wolfram, 2002.

Figura 1.6: comportamiento



(a) Comportamiento Clase III
Fuente: Wolfram, 2002.

(b) Comportamiento Clase IV
Fuente: Wolfram, 2002.

Figura 1.7: comportamiento

1.3. Minería de datos

Un sistema experto es un sistema computacional creado para almacenar información; permite resolver problemas o tomar decisiones en un determinado ámbito, es necesario hacer uso de los sistemas expertos cuando se disponen de muchos datos en la toma de decisiones. Para la comprensión de la información los sistemas expertos se relacionan con otras disciplinas como la minería de datos. La minería de datos es el proceso de “descubrimiento de conocimiento en bases” (KDD por sus siglas en inglés, Knowledge Discovery in Databases) donde se extrae la información de un conjunto de datos y es transformada en una estructura comprensible para su uso posterior. El hecho de descubrir conocimiento implica buscar patrones de comportamiento aún no conocidos en los datos (Santos, 2010).

El proceso de minería de datos consta de los siguientes pasos:

1. Selección de un conjunto de datos: Definir las variables objetivo (aquellas que se requieren para calcular) y las variables independientes (sirven para realizar el cálculo).
2. Análisis de las propiedades de los datos: Se realiza una visualización previa de los datos, para determinar qué aspectos pueden ser estudiados.
3. Limpieza de datos: Análisis exploratorio de los datos a fin de reducir el ruido y los valores nulos.
4. Seleccionar y aplicar la técnica de minería de datos: Se debe seleccionar el algoritmo adecuado, donde se necesita realizar la transformación de los datos al formato que requiere dicho algoritmo seleccionado.
5. Extracción de conocimiento: Se obtiene un modelo de conocimiento a partir de la técnica de minería de datos, el cual representa patrones de comportamiento observados en los valores de las variables del problema.
6. Evaluación e interpretación de datos: Se debe realizar la interpretación de los resultados obtenidos. Si los resultados no son los esperados, debe alterarse alguno de los pasos anteriores; esto puede generar repetir el proceso, quizás implementando otros datos, otros algoritmos y otras estrategias.

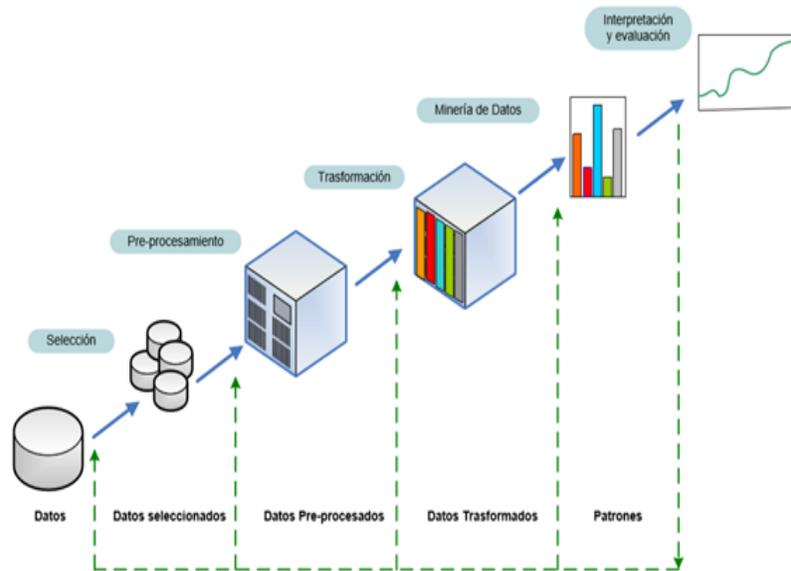


Figura 1.8: Proceso del descubrimiento del conocimiento de bases de datos (KDD).

Fuente: Santos,2010.

Entre las técnicas utilizadas por la minería de datos se encuentran los árboles de decisión que son modelos de predicción basados en reglas, utilizados para representar una serie de condiciones que suceden de forma sucesiva en un determinado problema. Entre los algoritmos utilizados para la construcción de árboles de decisión se encuentran: Algoritmo de Hunt (CLS 60's), ID3 (Quinlin 70's–80's), C4.5 (Quinlin 90's), J48, SLIQ y SPRINT.

Un árbol de decisión tiene unas variables de entrada descritas por un conjunto de atributos, estas variables son ordenadas de arriba hacia abajo partiendo del nodo raíz hasta alguna hoja, examinando las etiquetas específicas, cada rama del árbol llega hasta nuevos nodos correspondientes a otras variables de entrada.

En la (figura 1.9) se presenta un ejemplo de patrones de entrenamiento para tomar la decisión si jugar o no tenis. En este caso se presentan cuatro variables de entrada (Estado, Temp, Humedad, Viento) y una variable de salida (Juego tenis). Las variables de entrada, estado y temp tienen tres

posibles calificaciones o etiquetas (soleado, nublado, lluvia, y baja, suave y alta), las variables humedad y viento tienen dos etiquetas cada una (normal, alta y leve y fuerte), mientras que la variable de salida juego tenis solo puede tomar dos etiquetas sí o no.

PATRÓN	Estado	Temp	Humedad	Viento	Juego tenis
1	Soleado	Alta	Alta	Leve	No
2	Soleado	Alta	Alta	Fuerte	No
3	Nublado	Alta	Alta	Leve	Si
4	Lluvia	Suave	Alta	Leve	Si
5	Lluvia	Baja	Normal	Leve	Si
6	Lluvia	Baja	Normal	Fuerte	No
7	Nublado	Baja	Normal	Fuerte	Si
8	Soleado	Suave	Alta	Leve	No
9	Soleado	Baja	Normal	Leve	Si
10	Lluvia	Suave	Normal	Leve	Si
11	Soleado	Suave	Normal	Fuerte	Si
12	Nublado	Suave	Alta	Fuerte	Si
13	Nublado	Alta	Normal	Leve	Si
14	Lluvia	Suave	Alta	Fuerte	No

Figura 1.9: Tabla de patrones que define si el clima es apropiado o no para jugar tenis.

Fuente:Obregón, 2004.

A partir de la tabla de patrones(figura 1.9) se genera el árbol de decisión de la (figura 1.10) este árbol de decisión clasifica las variables en la toma de decisión si juega o no tenis. En el árbol el nodo inicial o raíz corresponde a una de las variables de entrada y será la que mejor clasifique los datos de entrenamiento. Los demás nodos serán las otras variables de entrada. Las ramas del árbol son las posibles etiquetas de la variable del nodo inmediatamente anterior y las hojas del árbol corresponden a los posibles valores que puede tomar la variable de salida.

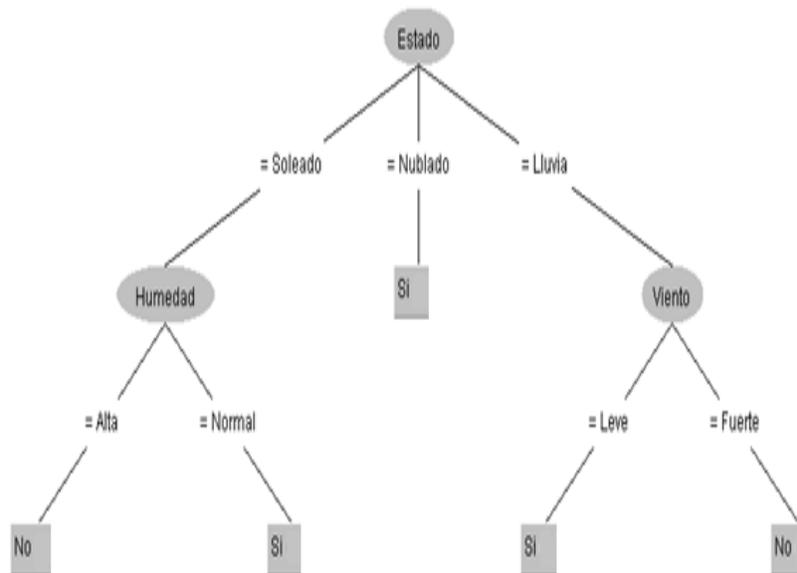


Figura 1.10: Árbol de decisión que define si el clima es apropiado o no para jugar tenis.

Fuente: Obregón, 2004.

Para la construcción del árbol de decisión se debe determinar ¿cuál de las variables de entrada debe ser el nodo raíz del árbol? Para solucionar este interrogante cada variable de entrada es evaluada usando un examen estadístico para determinar qué tan bien esta variable clasifica los patrones de entrenamiento; la variable que mejor represente esta clasificación es tomada como nodo inicial.

Uno de los criterios de selección para determinar el nodo inicial del árbol son: la ganancia de información y la entropía. La ganancia de información es un indicador del siguiente atributo a ser seleccionado para continuar con el proceso de división del árbol, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$G(M, A) = S(M) - \sum_{v \in V(A)} \frac{|Mv|}{|M|} S(Mv)$$

Donde:

M = Conjunto de entrenamiento.

A = Atributos de los objetos.

$G(M, A)$ = Es la ganancia de información del atributo A sobre la colección M .

$V(A)$ = Conjunto de valores que A puede tomar.

Mv = Es el subconjunto de M para el cual A toma el valor de v .

$S(M)$ = Es la entropía total del conjunto de datos de entrenamiento.

$S(Mv)$ = Es la entropía del subconjunto de datos de entrenamiento Mv .

La entropía es una medida comúnmente usada en la teoría de la información que puede ser considerada como una medida de la incertidumbre y de la información necesaria para, en cualquier proceso, se pueda reducir o eliminar la incertidumbre. Dada una colección S , la entropía de S se define como:

$$S = \sum_{i=1}^c -p_i \log_2(p_i)$$

Donde p_i es la proporción de S perteneciente a la clase i . El logaritmo es en base 2 porque la entropía es una medida de la longitud codificada en bits. (Mitchell, 1997).

Para el ejemplo presentado en la (figura 1.10), se calcula la entropía de la información del sistema para cada una de las variables de entrada. La variable

de entrada que proporcione la mayor ganancia de información al sistema será el nodo inicial. Para la variable Juego tenis con etiqueta si y no los valores 9 y 5 corresponden a la cantidad de patrones para los cuales jugar tenis cumplen las condiciones de si y no respectivamente, por lo tanto, la entropía es:

$$S = \sum_{i=1}^2 -p_i \log_2(p_i) = - \left[\frac{9}{14} \log_2 \left(\frac{9}{14} \right) + \frac{5}{14} \log_2 \left(\frac{5}{14} \right) \right] = 0,94$$

Ahora se procede a evaluar la entropía promedio de cada una de las variables de entrada y así poder calcular la ganancia de información del sistema con la respectiva variable con el fin de determinar el nodo inicial.

- Ganancia de información del sistema para la variable estado:

$$S_{soleado} = - \left[\frac{3}{5} \log_2 \left(\frac{3}{5} \right) + \frac{2}{5} \log_2 \left(\frac{2}{5} \right) \right] = 0,97$$

$$S_{nublado} = - \left[\frac{4}{4} \log_2 \left(\frac{4}{4} \right) \right] = 0$$

$$S_{lluvioso} = - \left[\frac{3}{5} \log_2 \left(\frac{3}{5} \right) + \frac{2}{5} \log_2 \left(\frac{2}{5} \right) \right] = 0,97$$

El promedio de la entropía para la variable estado:

$$\bar{E} = \frac{5(0,97) + 4(0) + 5(0,97)}{14} = 0,69$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 0,94 - 0,69 = 0,25 \text{ bits}$$

Se procede a realizar cada uno de estos cálculos con cada una de las variables de entrada, por lo tanto:

- ganancia de información del sistema para la variable temperatura:

$$S_{alta} = - \left[\frac{2}{4} \log_2 \left(\frac{2}{4} \right) + \frac{2}{5} \log_2 \left(\frac{2}{5} \right) \right] = 1,0$$

$$S_{baja} = - \left[\frac{3}{4} \log_2 \left(\frac{3}{4} \right) + \frac{1}{4} \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) \right] = 0,81$$

$$S_{suabe} = - \left[\frac{4}{6} \log_2 \left(\frac{4}{6} \right) + \frac{2}{6} \log_2 \left(\frac{2}{6} \right) \right] = 0,91$$

El promedio de la entropía para la variable temperatura del día:

$$\bar{E} = \frac{4(1,0) + 6(0,91) + 4(0,81)}{14} = 0,73$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 0,94 - 0,73 = 0,20 \text{ bits}$$

- ganancia de información del sistema para la variable humedad del día:

$$S_{alta} = - \left[\frac{3}{7} \log_2 \left(\frac{3}{7} \right) + \frac{4}{7} \log_2 \left(\frac{4}{7} \right) \right] = 0,98$$

$$S_{normal} = - \left[\frac{6}{7} \log_2 \left(\frac{6}{7} \right) + \frac{1}{7} \log_2 \left(\frac{1}{7} \right) \right] = 0,59$$

El promedio de la entropía para la variable humedad:

$$\bar{E} = \frac{7(0,98) + 7(0,59)}{14} = 0,785$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 0,94 - 0,785 = 0,15 \text{ bits}$$

- Ganancia de información del sistema para la variable viento:

$$S_{fuerte} = - \left[\frac{3}{6} \log_2 \left(\frac{3}{6} \right) + \frac{3}{6} \log_2 \left(\frac{3}{6} \right) \right] = 1,0$$

$$S_{leve} = - \left[\frac{6}{8} \log_2 \left(\frac{6}{8} \right) + \frac{2}{8} \log_2 \left(\frac{2}{8} \right) \right] = 0,81$$

El promedio de la entropía para la variable viento:

$$\bar{E} = \frac{6(1,0) + 8(0,81)}{14} = 0,89$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 0,94 - 0,89 = 0,05 \text{ bits}$$

Para este ejemplo propuesto, según con los cálculos anteriores la variable de entrada que se asigna como nodo inicial del árbol es el estado.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

El complejo de humedales se encuentra en el oriente urbano del municipio de Neiva, comprende las microcuencas La Jabonera con un área de $660,500 \text{ m}^2$, La Torcaza con un área de $4,123,873 \text{ m}^2$, La Toma-Curibano-Curibanito con un área de $2,665,192 \text{ m}^2$ y Avichente-Chaparro-Barrialosa con un área de $2,900,678 \text{ m}^2$ (Rincón y Rueda, 2018).

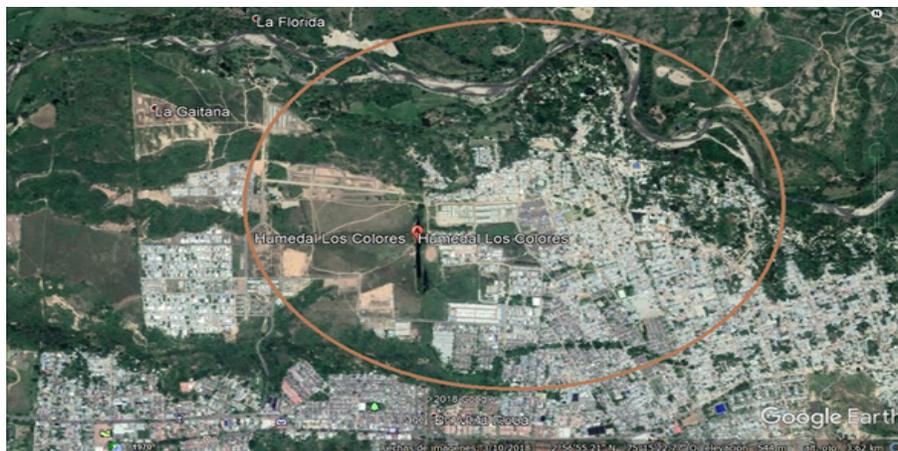


Figura 2.1: Área del Humedal 2018
Fuente: Google Earth-Image

La zona es un objeto de estudio bastante interesante, ya que en el año 2000, la Universidad Surcolombiana(sede Neiva) empezó a realizar monitoreo para establecer su importancia ecosistémica, y para conocer con certeza si contaba con flora y fauna silvestre; El estudio, que fue publicado en 2014, evidenció la presencia de 46 especies de aves (de las cuales 13 son propias de humedales y 8 migratorias), 8 especies de anfibios, una de reptiles y 2 de murciélagos; Entre las especies de aves encontradas, 6 son migratorias y de humedales, lo que significa que el humedal está interrelacionado con otros ecosistemas de humedales; Y en cuanto a flora, se identificaron 111 especies florísticas (agrupadas en 78 géneros y 37 familias) y 38 especies de ejemplares herbarias, que engalanan y visten con inmensidad de colores el verde de este ecosistema.

CAPÍTULO 3

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Reclasificación de imágenes disponibles

La información utilizada en este proyecto fueron cinco aerofotografías del complejo de humedales ubicado en el oriente de la ciudad de Neiva, clasificadas en distintos tipos de cobertura que conforman la zona en los años 1961, 1970, 1988, 2006, 2014.

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 28

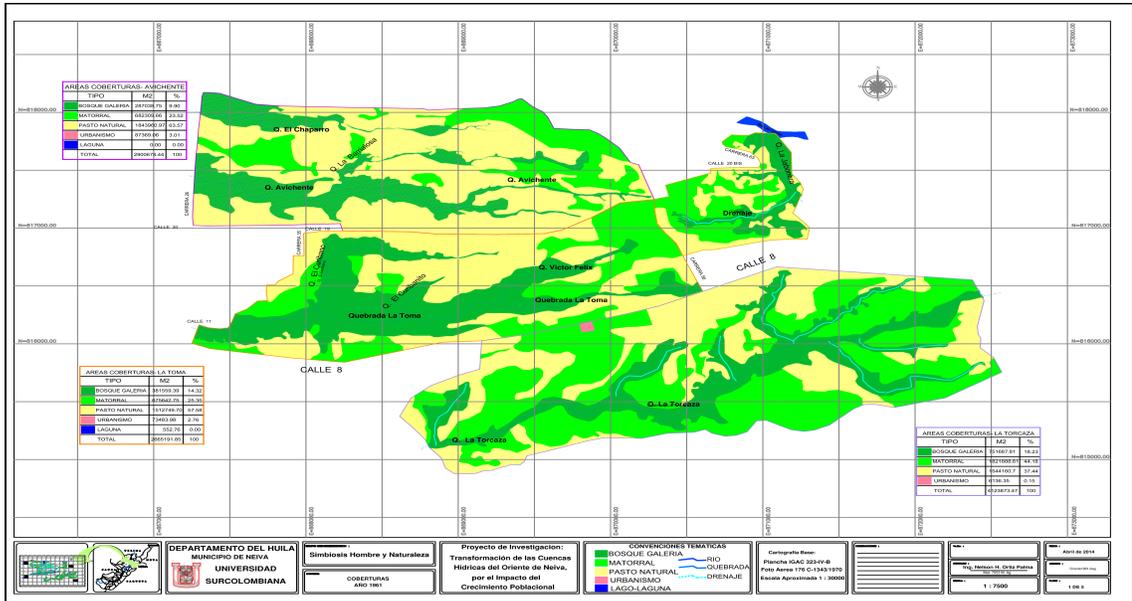


Figura 3.1: Cobertura del año 1961
Fuente: Rincón y Rueda, 2018

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 29

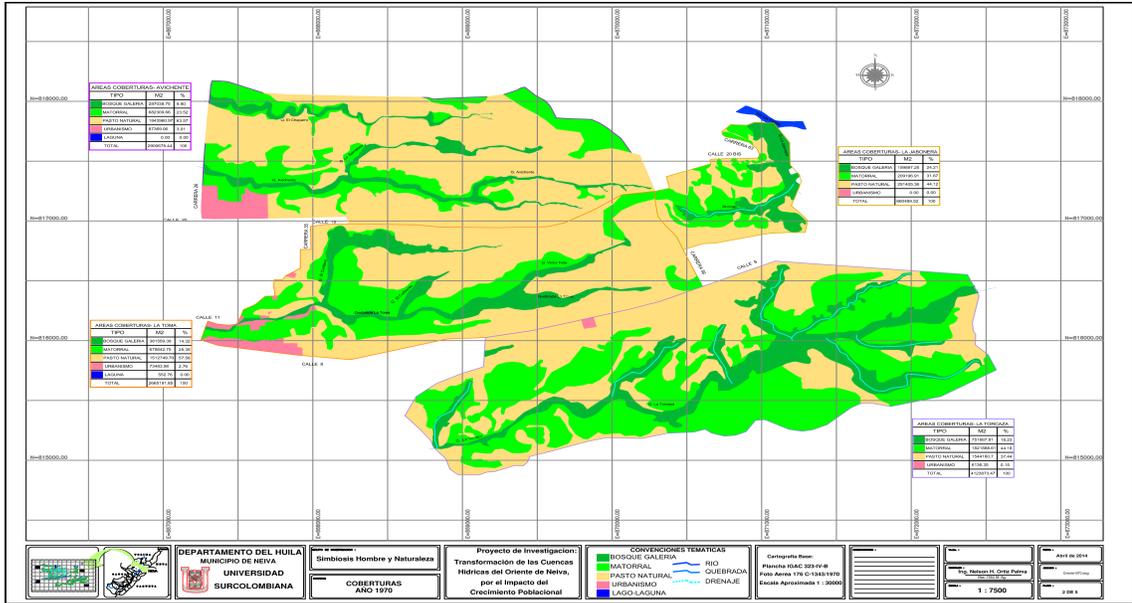


Figura 3.2: Cobertura del año 1970
Fuente: Rincón y Rueda, 2018

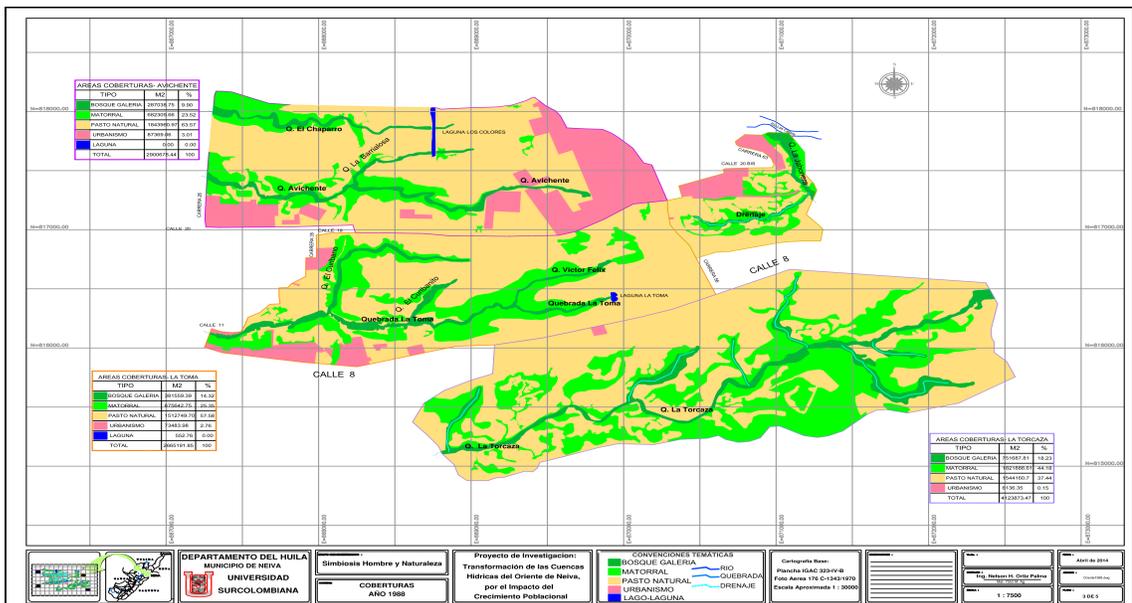


Figura 3.3: Cobertura del año 1988
Fuente: Rincón y Rueda, 2018

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 30

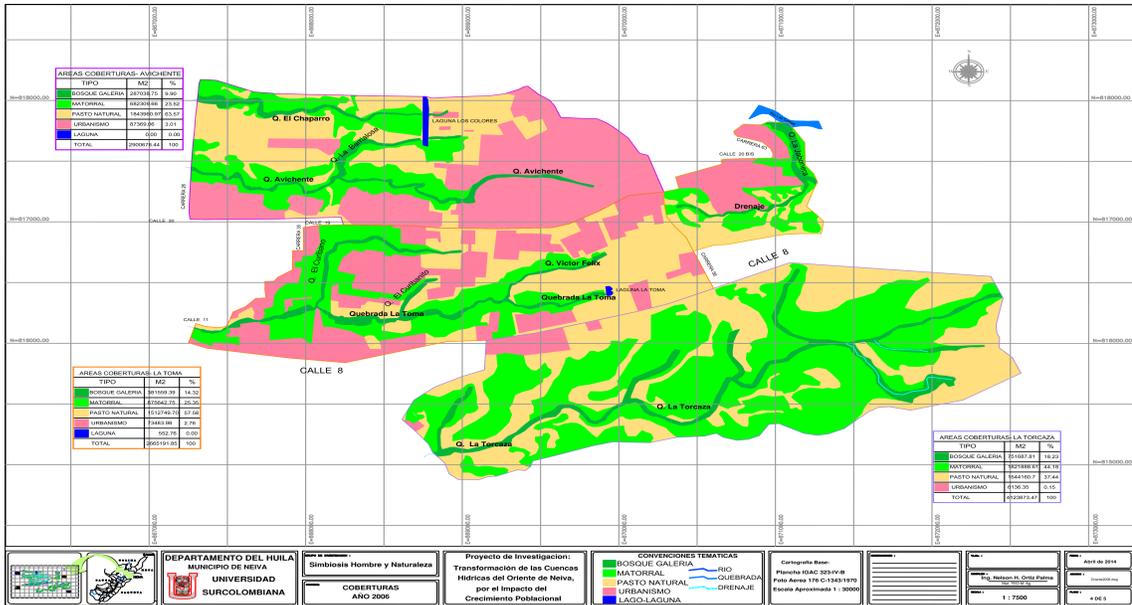


Figura 3.4: Cobertura del año 2006
Fuente: Rincón y Rueda, 2018

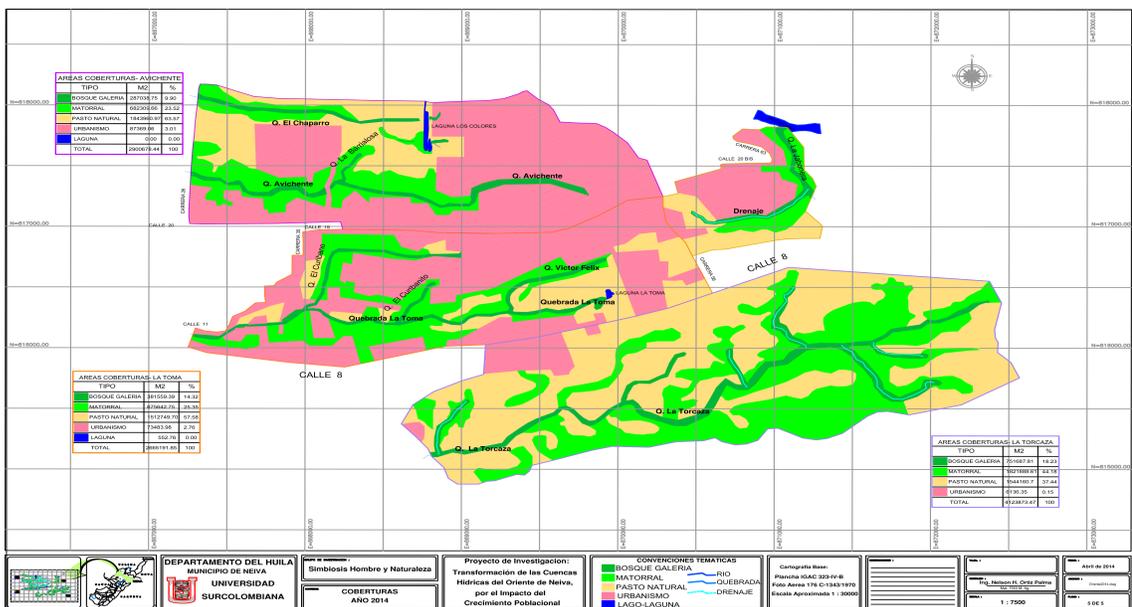


Figura 3.5: Cobertura del año 2014
Fuente: Rincón y Rueda, 2018

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 31

Las imágenes presentadas anteriormente fueron procesadas con ayuda de un sistema de información geográfico llamado ArcGIS versión 10.4.1 en el cual se realizó la georreferenciación con el fin de tener los mapas en el sistema de coordenadas geográficas apropiadas.

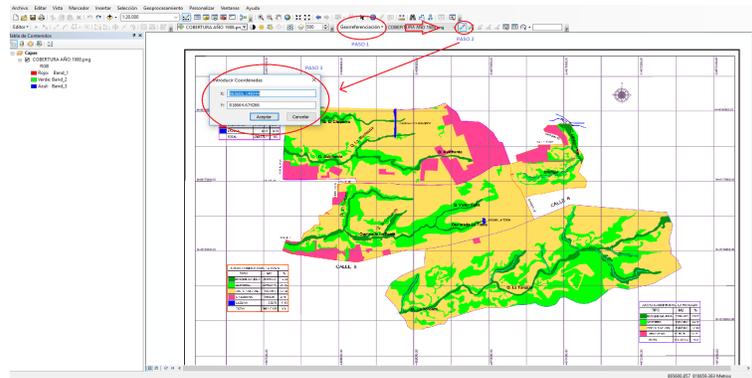


Figura 3.6: Proceso de georreferenciación en ArcGIS

Fuente: Autores

Seguidamente se llevó a cabo la vectorización de cada una de las figuras, es decir que para cada figura se crearon tres shapefile categorizando cada imagen en Bosque, Agua y Urbanización.

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 32

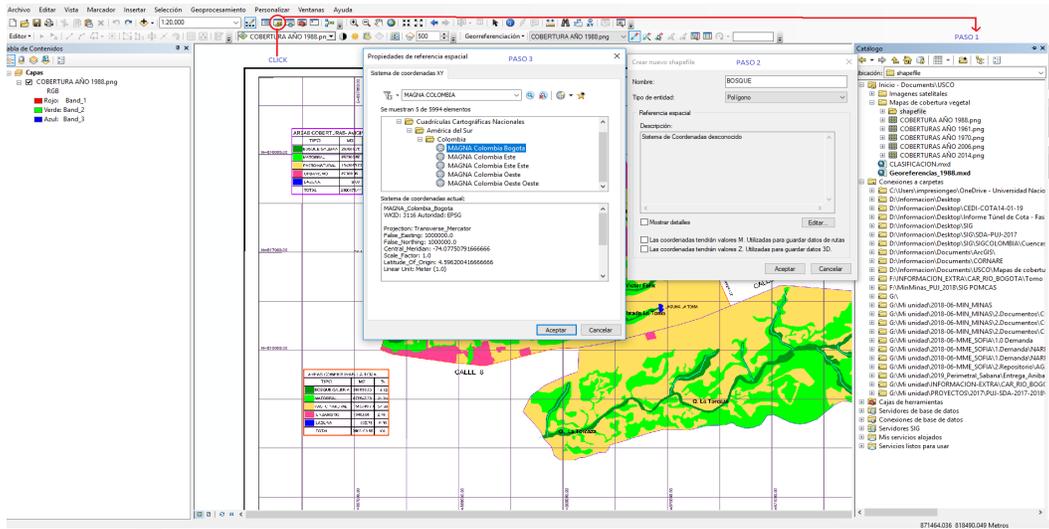


Figura 3.7: Creación de shapefile en ArcGIS
Fuente: Autores

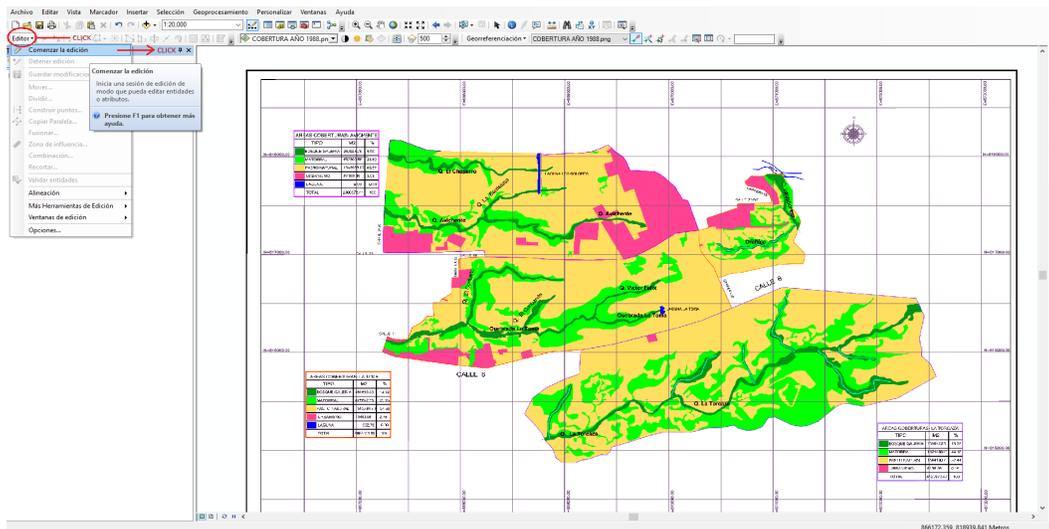


Figura 3.8: Creación de shapefile en ArcGIS
Fuente: Autores

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 33

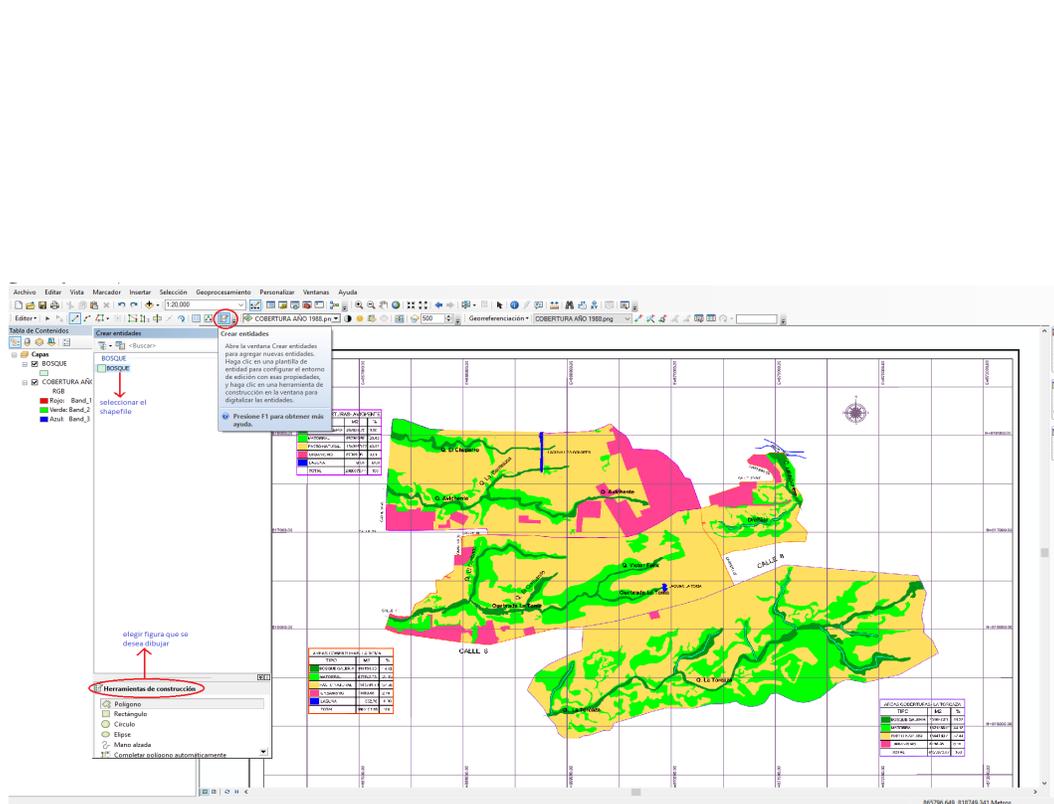


Figura 3.9: Creación de shapefile en ArcGIS
Fuente: Autores

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 34

Luego se efectuó la conversión de shapefile a Ráster para obtener una grilla y definir el tamaño de cada una de las celdas.

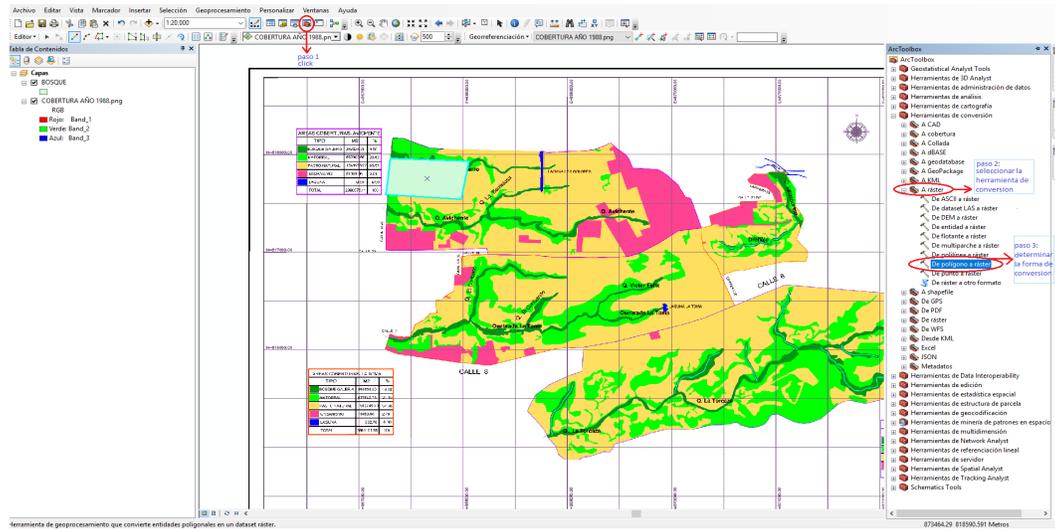


Figura 3.10: Conversión de Ráster a ASCII en ArcGIS
Fuente: Autores

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 35

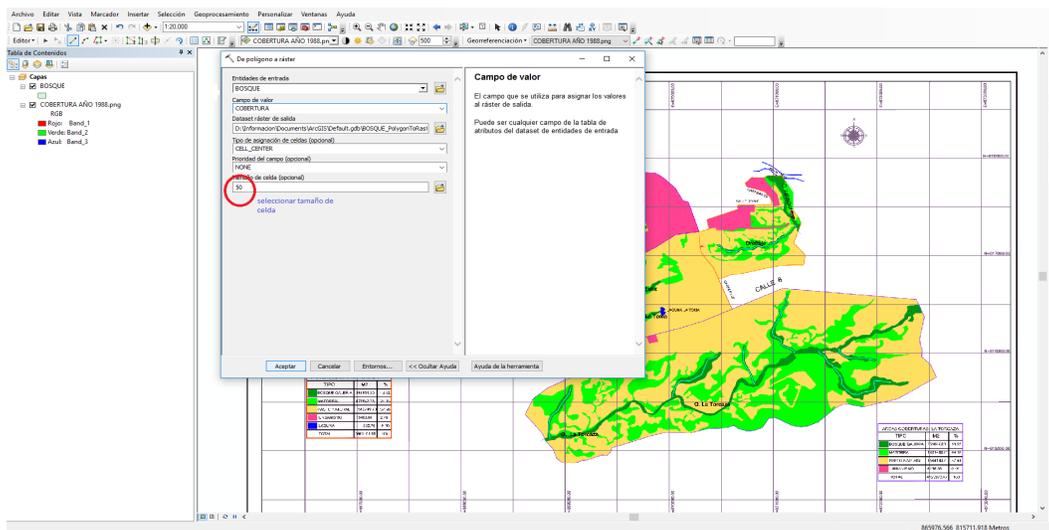


Figura 3.11: Conversión de Ráster a ASCII en ArcGIS
Fuente: Autores

3.1 Reclasificación de imágenes disponibles 36

Después se exporta esta información a formato ASCII.

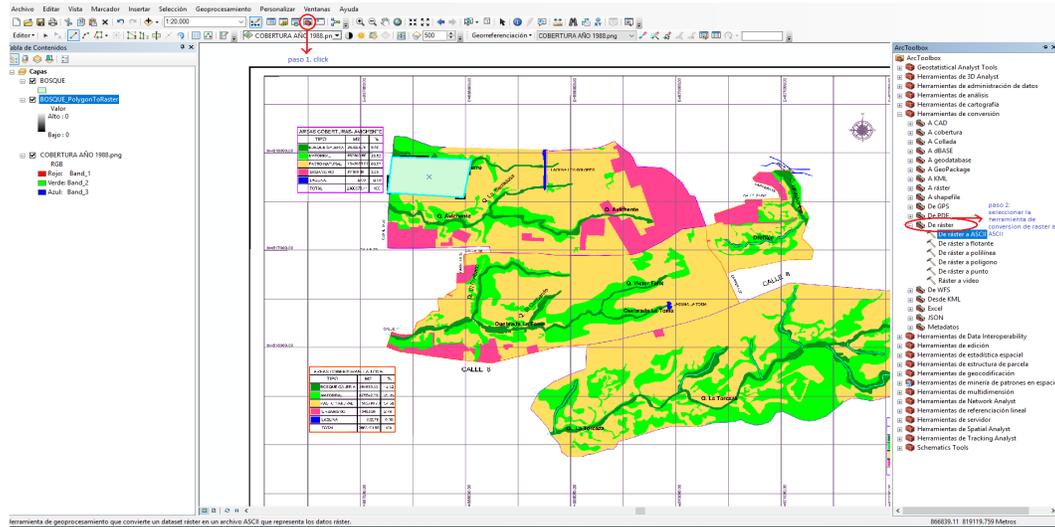


Figura 3.12: Conversión de Ráster a ASCII en ArcGIS

Fuente: Autores



Figura 3.14: Resumen del proceso de reclasificación de imágenes
Fuente: Autores

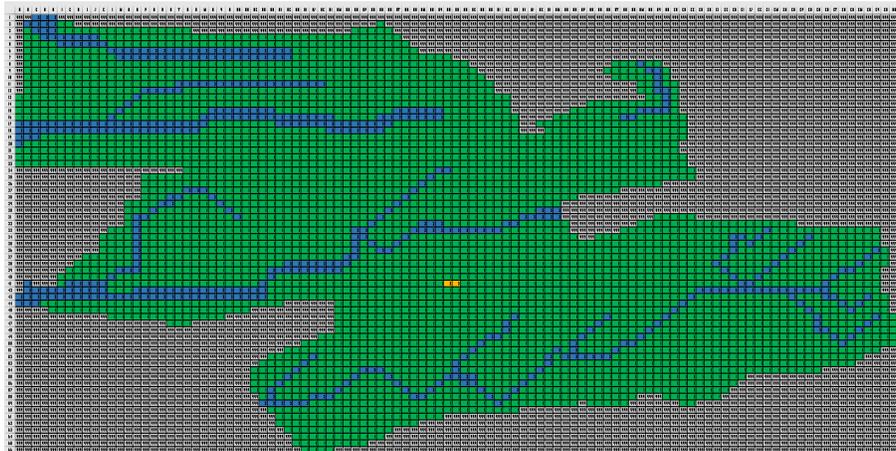


Figura 3.15: Reclasificación para el mapa de cobertura en el año 1961
Fuente: Autores

Por último, se crea un archivo Excel con la información reclasificada de cada una de las imágenes.

Los mapas reclasificados tienen la siguiente forma en Excel:

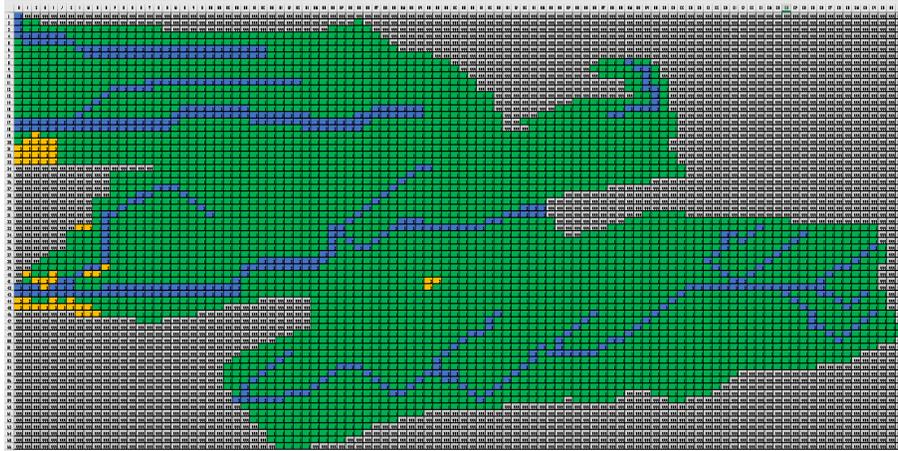


Figura 3.16: Reclasificación para el mapa de cobertura en el año 1970
Fuente: Autores

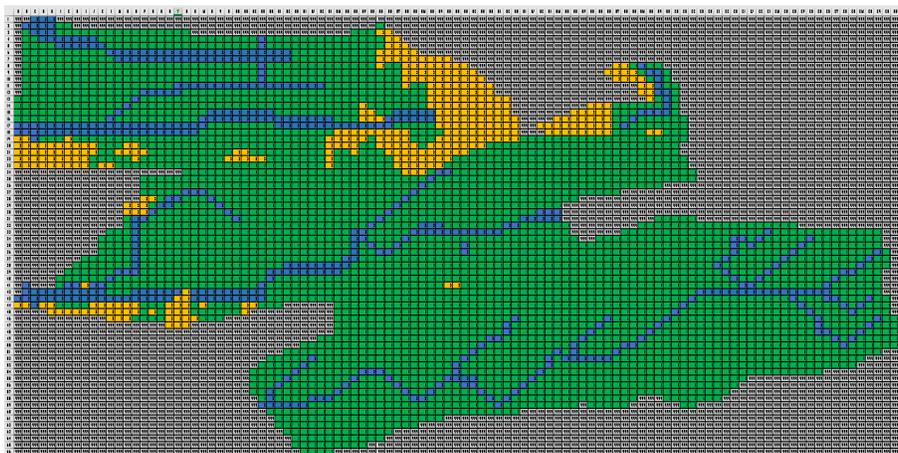


Figura 3.17: Reclasificación para el mapa de cobertura en el año 1988
Fuente: Autores

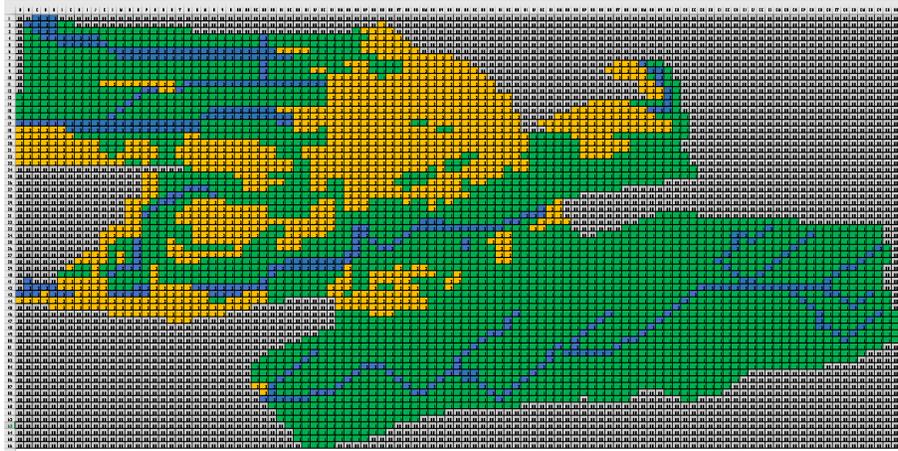


Figura 3.18: Reclasificación para el mapa de cobertura en el año 2006
Fuente: Autores

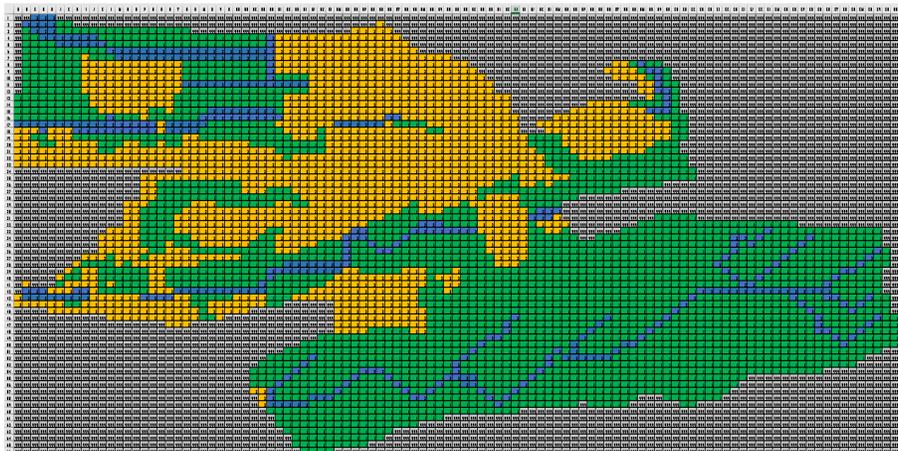


Figura 3.19: Reclasificación para el mapa de cobertura en el año 2014
Fuente: Autores

En Excel cada celda posee un valor asociado a cada tipo de cobertura, es decir:

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2

Figura 3.20: Valores de cada celda en Excel
Fuente: Autores

3.2. Construcción de la tabla de patrones

La tabla de patrones es una matriz donde el número de columnas es igual al número de celdas que tenga la vecindad (tipo Moore) y el número de filas es igual al número de celdas de la imagen clasificada (Ana Carolina,2010). Para evitar confusiones en la construcción de la tabla de patrones se utiliza la siguiente nomenclatura para la plantilla tipo Moore:

NW	N	NE
W	C	E
SW	S	SE

Figura 3.21: Nomenclatura plantilla Moore
Fuente: Autores

3.2 Construcción de la tabla de patrones 42

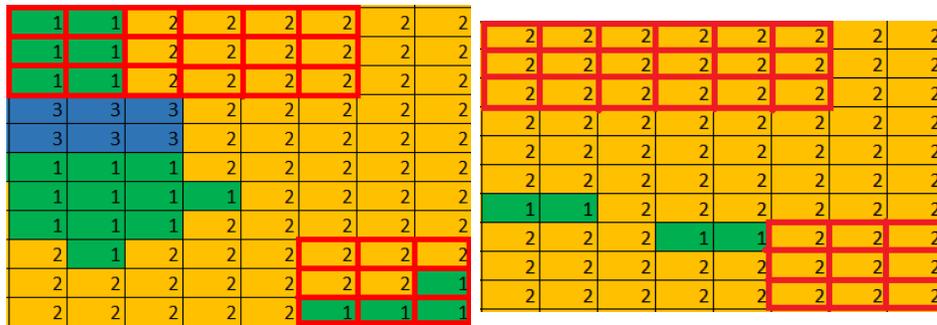
La tabla de patrones se construye escribiendo para cada celda i, j la plantilla Moore de manera lineal y agregando una nueva columna llamada CF la cual es el comportamiento de la celda central en el tiempo futuro, es decir:

NW	N	NE	W	C	E	SW	S	SE	CF
----	---	----	---	---	---	----	---	----	----

Figura 3.22: Nomenclatura plantilla Moore

Fuente: Autores

Por tanto, algunas filas de la tabla de patrones que se obtiene en este proyecto son las siguientes:



(a) Mapa clasificado del tiempo t

Fuente: Wolfram, 2002.

(b) Mapa clasificado del tiempo $t + 1$

Fuente: Wolfram, 2002.

NW	N	NE	W	C	E	SW	S	SE	CF
1	1	2	1	1	2	1	1	2	2
1	2	2	1	2	2	2	2	2	2
...
2	2	2	2	2	1	1	1	1	2

Figura 3.24: Algunas líneas de la tabla de patrones construidas en este proyecto

Fuente: Autores

3.3. Construcción de las reglas del AC utilizando minería de datos

Para la construcción de las reglas del AC aplicando minería de datos se hace uso de la tabla de patrones descrita anteriormente, y se implementa los árboles de decisión, para ello se utiliza el software WEKA versión 3.8 y el algoritmo J48 para su respectiva construcción. Para el procesamiento de los datos el algoritmo J48 se ejecuta de la siguiente manera:

1. Cada nodo es asignado a una variable en este caso (NW, N, NE, W, C, E, SW, S, SE) y cada rama del árbol corresponde al atributo de las variables (agua, bosque, urba). Una hoja del árbol especifica el valor esperado de la decisión de acuerdo con los patrones encontrados.
2. A cada nodo se le asocia aquella variable más informativa que aún no haya sido considerado en la trayectoria desde la raíz.
3. La información de cada variable es medida empleando la entropía. Cuanto menor sea el valor de la entropía, menor será la incertidumbre y más útil será la variable para la clasificación.

Posteriormente, se realiza un cambio en la tabla de patrones generada para poder ser ejecutada en WEKA, teniendo en cuenta que este software al momento de generar el árbol solo toma variables cualitativas se realiza el respectivo cambio de las etiquetas de los atributos: 1: Bosque, 2: Urba y 3: Agua.

En el cuadro anterior se presenta el árbol de decisión en formato de texto, generado por el software WEKA para el AC desarrollado en esta investigación.

```

C = Agua
| SE = Agua: Agua
| SE = Bosque
|| N = Agua: Agua
|| N = Bosque
||| NW = Agua: Agua
||| NW = Bosque: Agua
||| NW = Urba: Bosque
|| N = Urba: Urba
| SE = Urba: Urba
C = Bosque
| SW = Agua: Bosque
| SW = Bosque
|| S = Agua: Bosque
|| S = Bosque
||| NE = Agua: Bosque
||| NE = Bosque: Bosque
||| NE = Urba: Urba
|| S = Urba: Urba
| SW = Urba: Urba
C = Urba: Urba

```

En la figura (3.25) se observa la forma del árbol generado anteriormente, el nodo raíz corresponde a la celda C (Centro) de la vecindad de Moore, para definir que ruta seguir en el momento de tomar una decisión la posición “Centro” puede tomar tres valores “Agua”, “Bosque” o “Urba” para así llegar al siguiente nodo. Este proceso se lleva a cabo sucesivamente hasta llegar a una hoja donde se toma la decisión del estado de la celda CF del tiempo $t + 1$.

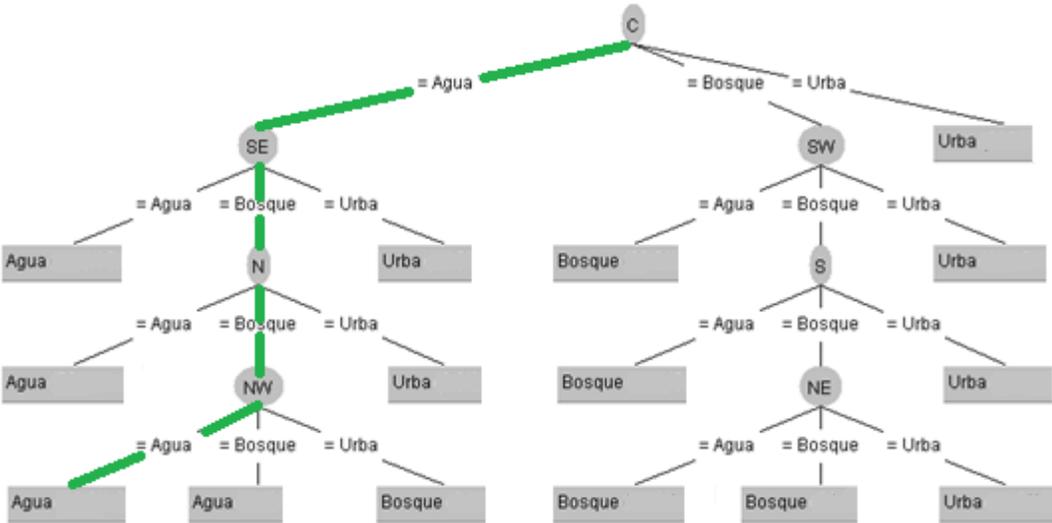


Figura 3.25: Árbol de decisión J48 obtenido de WEKA
Fuente: Autores

Tomando como referencia la línea verde que se resalta en el árbol de la Figura (3.25), la definición de la regla se expresa como:

Si C= Agua
 Y SE= Bosque
 Y N= Bosque
 Y NW= Agua
 Entonces CF=Agua

Que se puede expresar como:

Si la vecindad en la posición Centro tiene valor de Agua
Y la vecindad en la posición Sureste tiene valor de Bosque
Y la vecindad en la posición Norte tiene valor de bosque
Y la vecindad en la posición Noroeste tiene valor de Agua
Entonces el valor de la posición Centro en tiempo $t + 1$ es de Agua.

WEKA también nos proporciona la matriz de confusión figura (3.26) la cual nos permite la visualización del desempeño del algoritmo. Cada columna de la matriz representa el número de predicciones de cada clase, y las filas representan las instancias en la clase real.

		Valor predicho			
		a	b	c	
Valor real	a	143	13	32	a = Agua
	b	29	122	109	b = Bosque
	c	65	65	285	c = Urba

Figura 3.26: Matriz de confusión de árbol de decisión J48 obtenido de WEKA
 Fuente: Autores

Análisis de la matriz de confusión:

- De 188 zonas de agua existentes, el sistema predijo que 13 eran zonas de bosque, 32 eran zonas de urba y predice que 143 eran zonas de agua, es decir que tiene un desacierto de $45/188$ lo que equivale a un error del 23 %.
- De 260 zonas de bosque existentes, el sistema predijo que 29 eran zonas de agua, 109 eran zonas de urba y predice que 122 eran zonas de agua, es decir que tiene un desacierto de $138/260$ lo que equivale a un error del 53 %.

3.3 Construcción de las reglas del AC utilizando minería de datos

- De 415 zonas de urba existentes, el sistema predijo que 65 eran zonas de agua, 65 eran zonas de bosque y predice que 285 eran zonas de urba, es decir que tiene un desacierto de 130/415 lo que equivale a un error del 31%.

Para determinar la precisión global del sistema, se suma la diagonal principal y se divide entre la suma de todas las columnas de la matriz:

$$\frac{550}{863} \approx 0,6373 = 63,73$$

Se realiza una verificación del árbol de decisión que nos proporcionó el software WEKA, Para dicha verificación se utiliza el conjunto de patrones descritas en la figura (3.27)

NW	N	NE	W	C	E	SW	S	SE	CF
bosque	agua	bosque	bosque	agua	bosque	bosque	Agua	bosque	Agua
bosque	bosque	bosque	bosque	bosque	bosque	urba	Bosque	bosque	bosque
bosque	bosque	bosque	bosque	agua	Agua	agua	Agua	agua	Urba
agua	agua	agua	agua	bosque	Agua	bosque	Agua	urba	Agua
agua	agua	agua	agua	urba	Agua	bosque	Agua	bosque	Agua
agua	agua	agua	agua	bosque	Agua	urba	Agua	bosque	Agua
agua	agua	agua	bosque	bosque	Agua	bosque	Agua	bosque	bosque
agua	agua	agua	agua	bosque	Agua	bosque	Agua	bosque	Urba
agua	agua	agua	agua	bosque	bosque	bosque	Agua	bosque	Urba
agua	agua	bosque	agua	bosque	bosque	bosque	Bosque	bosque	Urba
agua	bosque	bosque	urba	bosque	Agua	urba	Agua	agua	Agua
bosque	bosque	bosque	bosque	bosque	bosque	urba	Bosque	agua	Urba
agua	bosque	bosque	agua	agua	bosque	agua	Bosque	agua	Urba
bosque	bosque	urba	bosque	agua	bosque	agua	Bosque	agua	bosque

Figura 3.27: Muestra de la tabla de patrones para verificar el nodo raíz del árbol J48 obtenido de WEKA

Fuente: Autores

Primero se calcula la entropía de la información, para ello se calcula la entropía de la variable de salida, es decir la variable CF (centro en el tiempo futuro) con etiqueta agua, bosque y urba. Los valores 5, 3 y 6 corresponden a

la cantidad de patrones para los cuales CF cumplen las condiciones de agua, bosque y urba respectivamente, por lo tanto, la entropía es:

$$Entropia(S) = - \left[\frac{5}{14} \log_2 \left(\frac{5}{14} \right) + \frac{3}{14} \log_2 \left(\frac{3}{14} \right) + \frac{6}{14} \log_2 \left(\frac{6}{14} \right) \right] = 1,51$$

Ahora se procede a evaluar la entropía promedio de cada una de las variables de entrada y así poder calcular la ganancia de información del sistema con la respectiva variable. La variable de entrada que proporcione la mayor ganancia de información al sistema será el nodo inicial.

- **Ganancia de información del sistema para la variable C (centro):**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{3}{9} \log_2 \left(\frac{3}{9} \right) + \frac{2}{9} \log_2 \left(\frac{2}{9} \right) + \frac{4}{9} \log_2 \left(\frac{4}{9} \right) \right] = 1,5$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{1}{4} \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) + \frac{1}{4} \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) + \frac{2}{4} \log_2 \left(\frac{2}{4} \right) \right] = 1,5$$

$$Entropia_{urba}(S) = - \left[\frac{1}{1} \log_2 (1) \right] = 0$$

El promedio de la entropía para la variable C (centro):

$$\bar{E} = \frac{3(1,5) + 4(1,5)}{14} = 0,75$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 0,75 = 0,76 \text{ bits}$$

- **Ganancia de información del sistema para la variable NW:**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{1}{5} \log_2 \left(\frac{1}{5} \right) + \frac{2}{5} \log_2 \left(\frac{2}{5} \right) + \frac{2}{5} \log_2 \left(\frac{2}{5} \right) \right] = 1,5$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{4}{9} \log_2 \left(\frac{4}{9} \right) + \frac{1}{9} \log_2 \left(\frac{1}{9} \right) + \frac{4}{9} \log_2 \left(\frac{4}{9} \right) \right] = 1,36$$

El promedio de la entropía para la variable C (centro):

$$\bar{E} = \frac{5(1,5) + 9(1,36)}{14} = 1,41$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 1,41 = 0,1 \text{ bits}$$

■ **Ganancia de información del sistema para la variable SW:**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{3}{7} \log_2 \left(\frac{3}{7} \right) + \frac{1}{7} \log_2 \left(\frac{1}{7} \right) + \frac{3}{7} \log_2 \left(\frac{3}{7} \right) \right] = 1,43$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{1}{3} \log_2 \left(\frac{1}{3} \right) + \frac{1}{3} \log_2 \left(\frac{1}{3} \right) + \frac{1}{3} \log_2 \left(\frac{1}{3} \right) \right] = 1,56$$

$$Entropia_{urba}(S) = - \left[\frac{2}{4} \log_2 \left(\frac{2}{4} \right) + \frac{1}{4} \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) + \frac{1}{4} \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) \right] = 1,5$$

El promedio de la entropía para la variable SW:

$$\bar{E} = \frac{7(1,43) + 3(1,56) + 4(1,5)}{14} = 1,47$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 1,47 = 0,04 \text{ bits}$$

■ **Ganancia de información del sistema para la variable N:**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{1}{6} \log_2 \left(\frac{1}{6} \right) + \frac{2}{6} \log_2 \left(\frac{2}{6} \right) + \frac{3}{6} \log_2 \left(\frac{3}{6} \right) \right] = 1,44$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{4}{8} \log_2 \left(\frac{4}{8} \right) + \frac{1}{8} \log_2 \left(\frac{1}{8} \right) + \frac{3}{8} \log_2 \left(\frac{3}{8} \right) \right] = 1,38$$

El promedio de la entropía para la variable N:

$$\bar{E} = \frac{6(1,44) + 8(1,38)}{14} = 1,40$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 1,40 = 0,11 \text{ bits}$$

- **Ganancia de información del sistema para la variable NE:**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{2}{7} \log_2 \left(\frac{2}{7} \right) + \frac{1}{7} \log_2 \left(\frac{1}{7} \right) + \frac{4}{7} \log_2 \left(\frac{4}{7} \right) \right] = 1,36$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{3}{6} \log_2 \left(\frac{3}{6} \right) + \frac{1}{6} \log_2 \left(\frac{1}{6} \right) + \frac{2}{6} \log_2 \left(\frac{2}{6} \right) \right] = 1,44$$

$$Entropia_{urba}(S) = - \left[\frac{1}{1} \log_2 (1) \right] = 0$$

El promedio de la entropía para la variable NE:

$$\bar{E} = \frac{7(1,36) + 6(1,44)}{14} = 1,29$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 1,29 = 0,22 \text{ bits}$$

- **Ganancia de información del sistema para la variable W:**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{1}{6} \log_2 \left(\frac{1}{6} \right) + \frac{3}{6} \log_2 \left(\frac{3}{6} \right) + \frac{2}{6} \log_2 \left(\frac{2}{6} \right) \right] = 1,44$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{3}{7} \log_2 \left(\frac{3}{7} \right) + \frac{4}{7} \log_2 \left(\frac{4}{7} \right) \right] = 0,98$$

$$Entropia_{urba}(S) = - \left[\frac{1}{1} \log_2 (1) \right] = 0$$

El promedio de la entropía para la variable W:

$$\bar{E} = \frac{6(1,44) + 7(0,98)}{14} = 1,10$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 1,10 = 0,41 \text{ bits}$$

- **Ganancia de información del sistema para la variable E:**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{1}{7} \log_2 \left(\frac{1}{7} \right) + \frac{2}{7} \log_2 \left(\frac{2}{7} \right) + \frac{4}{7} \log_2 \left(\frac{4}{7} \right) \right] = 1,36$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{4}{7} \log_2 \left(\frac{4}{7} \right) + \frac{1}{7} \log_2 \left(\frac{1}{7} \right) + \frac{2}{7} \log_2 \left(\frac{2}{7} \right) \right] = 1,36$$

El promedio de la entropía para la variable E:

$$\bar{E} = \frac{7(1,36) + 7(1,36)}{14} = 1,36$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 1,36 = 0,15 \text{ bits}$$

■ **Ganancia de información del sistema para la variable S:**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{1}{5} \log_2 \left(\frac{1}{5} \right) + \frac{2}{5} \log_2 \left(\frac{2}{5} \right) + \frac{2}{5} \log_2 \left(\frac{2}{5} \right) \right] = 1,5$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{5}{9} \log_2 \left(\frac{5}{9} \right) + \frac{1}{9} \log_2 \left(\frac{1}{9} \right) + \frac{3}{9} \log_2 \left(\frac{3}{9} \right) \right] = 1,33$$

El promedio de la entropía para la variable S:

$$\bar{E} = \frac{5(1,5) + 9(1,33)}{14} = 1,39$$

luego, la ganancia de información para estas variables es:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 1,39 = 0,12 \text{ bits}$$

■ **Ganancia de información del sistema para la variable SE:**

$$Entropia_{bosque}(S) = - \left[\frac{3}{8} \log_2 \left(\frac{3}{8} \right) + \frac{2}{8} \log_2 \left(\frac{2}{8} \right) + \frac{3}{8} \log_2 \left(\frac{3}{8} \right) \right] = 1,54$$

$$Entropia_{agua}(S) = - \left[\frac{1}{5} \log_2 \left(\frac{1}{5} \right) + \frac{1}{5} \log_2 \left(\frac{1}{5} \right) + \frac{3}{5} \log_2 \left(\frac{3}{5} \right) \right] = 1,35$$

$$Entropia_{urba}(S) = - \left[\frac{1}{1} \log_2 (1) \right] = 0$$

El promedio de la entropía para la variable SE:

$$\bar{E} = \frac{8(1,54) + 5(1,35)}{14} = 1,36$$

luego, la ganancia de información para la variable SE:

$$GI_{S|A} = 1,51 - 1,36 = 0,15 \text{ bits}$$

Según con los cálculos realizados la variable de entrada que se asigna como nodo inicial del árbol es C (Centro) observado en la figura (3.25).

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

4.1. Construcción matemática de los elementos del modelo de AC

4.1.1. Definición del plano o lattice

La lattice del AC es tal que:

$$l = (x, y) \mid 867,200 < x < 872,600, \quad 818,300 < y < 814,500$$

Donde x, y son coordenadas geográficas, además x es en dirección Este–Oeste, y en dirección Norte–Sur y $l \in \mathbb{R}^2$, el tamaño de este plano está delimitado por el área de estudio el cual es un rectángulo de 5400 metros de largo y 3500 metros de ancho, es una malla dividida en celdas de igual tamaño de 50 metros, que posee 66 filas y 106 columnas.

4.1.2. Vecindad

Se utiliza una vecindad rectangular de radio 1, es decir una vecindad tipo Moore: escrita matemáticamente como:

$$C((i, j), r) \subset l$$

Donde i representa la fila y j la columna de la malla, r es el radio y l es la lattice. Por tanto las vecindades para la celda i, j son:

$i-1, j-1$	$i-1, j$	$i-1, j+1$
$i, j-1$	i, j	$i, j+1$
$i+1, j-1$	$i+1, j$	$i+1, j+1$

Figura 4.1: Vecindad tipo Moore para la celda i, j .

Fuente: Autores.

4.1.3. Estados de celda y configuración inicial

Sea S el conjunto de estados del AC con k elementos, en este caso tenemos $k = 3$, etiquetados de la siguiente forma: Bosque(1), Urba(2), Agua(3).

$$S = \{1, 2, 3\}$$

La configuración inicial M_0 es la información que se tiene del proceso de clasificación de imágenes en el tiempo t_0 es decir en el año 1961, esta será una matriz en la que cada celda posee un valor que varía entre 1, 2 ó 3.

4.1.4. Reglas de transición

Las reglas de transición se pueden expresar matemáticamente de la siguiente manera:

Si k es el número de estados posibles y n el número de celdas en el vecindario, entonces habrán k^n posibles reglas de transición del AC, de esta manera el estado de un AC en un tiempo $t + 1$ está en función de la configuración de estados en el tiempo t es decir $M_1 = f(M_0)$ donde M_0 es la configuración en

t_0 y M_1 es la configuración en t_1 .

Sea E_p el conjunto de estados $[a, b, c, \dots, k]$ que puede tomar el AC en el tiempo t , E_{p+1} el conjunto de estados $[a, b, c, \dots, k]$ que puede tomar el AC en el tiempo $t + 1$, y T_{ij} los estados de las vecindades de la posición central i, j en el tiempo t , Así la configuración de estados en el tiempo $t + 1$ para la posición central i, j depende del estado en la posición central i, j y de los estados de los todas las celdas de su vecindad en el tiempo t , luego la representación del estado de una celda en particular en función del estado de sus vecinos y de las reglas de transición planteadas se puede representar de la siguiente manera.

$$E_{p+1}T_{ij}^* = f(E_pT_{ij}E_pT_{i-1j-1}E_pT_{i-1j}E_pT_{ij-1}E_pT_{ij+1}E_pT_{i+1j}E_pT_{i+1j-1}E_pT_{i-1j+1}E_pT_{i+1j+1})$$

Donde T_{ij}^* son los estados de las vecindades de la posición central i, j en el tiempo $t + 1$.

4.1.5. Construcción de herramienta computacional

La metodología para la construcción de la herramienta computacional puede resumirse de la siguiente manera:

1. Reclasificación de los mapas de cobertura vegetal en ArcGIS utilizando las herramientas. Georreferenciación/ creación de shapefile/conversión a Ráster/conversión a ASCII/ organizar de ASCII a Excel.
2. Lectura del archivo Excel en MATLAB, con la información clasificada para la creación de la tabla de patrones de cada tiempo. Para ello ejecutamos el código *PATRONES.m* el cual se encuentra en la sesión de anexos de este documento y en el archivo Excel que genera este código se eliminan las filas que contengan el dato 999 en al menos una de sus celdas y se agrega una nueva columna con el comportamiento de la posición central de cada plantilla Moore de los tiempos siguientes.
3. Lectura del archivo Excel (modificado en el paso anterior) en MATLAB, para eliminar las filas repetidas de las tablas de patrones. Aquí se ejecuta el código *ELIMINAR_REPETIDOS.m* contenido en los anexos de este documento.

4. Reproducción del autómata celular

La reproducción del autómata celular puede ser de dos maneras:

- Realizando la lectura de toda la tabla de patrones construida en el paso anterior.
- Interpretando las reglas obtenidas por árbol de decisión J48 que genera el software WEKA.

Para reproducir el autómata en el primer ítem procedemos de la siguiente manera:

- Lectura de la información del mapa clasificado y la tabla de patrones sin filas repetidas en MATLAB para realizar el algoritmo que reproduce el autómata, este algoritmo hace que una matriz 3×3 (plantilla Moore) recorra la matriz con la información clasificada y que para cada celda central i, j de la plantilla Moore identifique sus ocho vecinas para compararlas con las primeras nueve columnas de cada fila de la tabla de patrones, si estas son completamente iguales, la celda central i, j en el tiempo futuro toma el valor de la última columna de la tabla de patrones.

Luego, para realizar la reproducción del autómata haciendo uso de las reglas que genera el árbol de decisión en WEKA ejecutamos los siguientes pasos:

1. Reclasificar la tabla de patrones sin filas repetidas a datos lingüísticos ya que el software WEKA no reconoce valores numéricos.
2. Realizar la minería de datos con el software WEKA para obtener las reglas que gobiernan la tabla de patrones.
3. Las reglas que genera el software WEKA se deben reordenar en valores numéricos para que puedan ser ejecutadas en MATLAB.
4. Finalmente se construye el algoritmo que reproduce el autómata en el cual se tiene en cuenta las reglas construidas en WEKA realizando los cambios en una matriz de condición inicial para generar las matrices de los tiempos futuros.

La reproducción del autómata en este documento se realizó solamente utilizando toda la tabla de patrones, es de aclarar que en esta investigación se presenta la metodología y el análisis de como extraer las reglas de la tabla de patrones utilizando minería de datos. Pero no se ejecuta el código basado en estas reglas por cuestiones de tiempo y herramienta computacional.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la consolidación de este documento se tuvieron en cuenta cinco aerofotografías tomadas en los años 1961, 1970, 1988, 2006 y 2014 evidentemente estas imágenes no están regularmente espaciadas en el tiempo y la diferencia de los años que hay entre cada imagen varía entre 8 y 18 años, es por ello que se toma un valor promedio aproximado para realizar cada iteración, es decir $\Delta t = 9$ años.

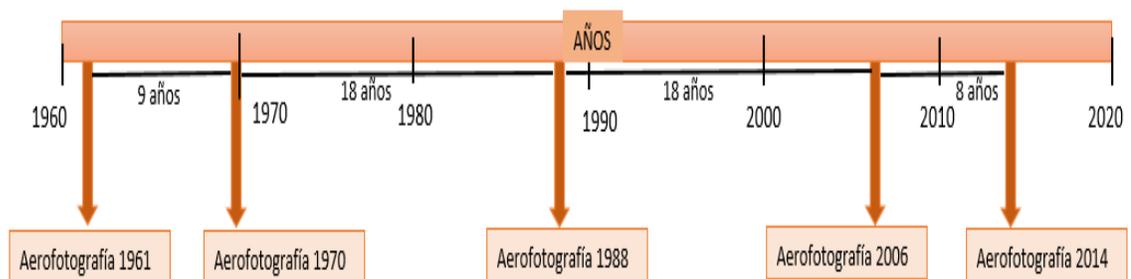


Figura 5.1: Línea de tiempo para determinar el espacio que hay entre cada imagen.

Fuente: Autores.

Tomando como condición inicial para la reproducción del autómata, el mapa

clasificado del año 1961 y según el Δt elegido, la matriz generada corresponde a la imagen clasificada del año 1970 como se muestra en la (figura 5.2).

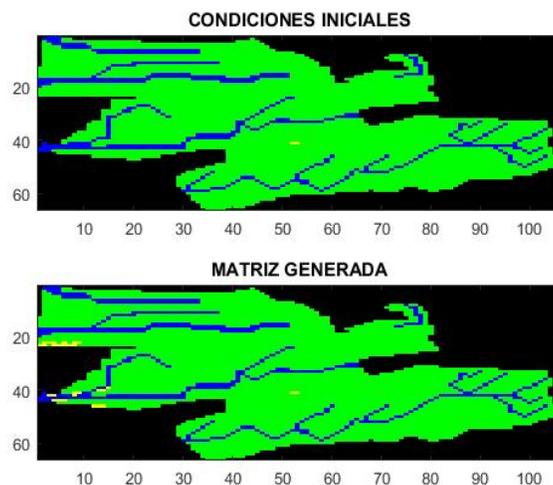


Figura 5.2: Reproducción de AC con condición inicial equivalente al mapa clasificado del año 1961.

Fuente: Autores.

En la (figura 5.2) observamos pequeños cambios en algunas celdas de la matriz generada que toman el estado urbanización(amarillo), dichas celdas en la matriz condición inicial tenían el estado bosque(verde). En este caso utilizamos el mapa clasificado del año 1970 para comparar los resultados obtenidos de la reproducción del AC en la primera iteración.

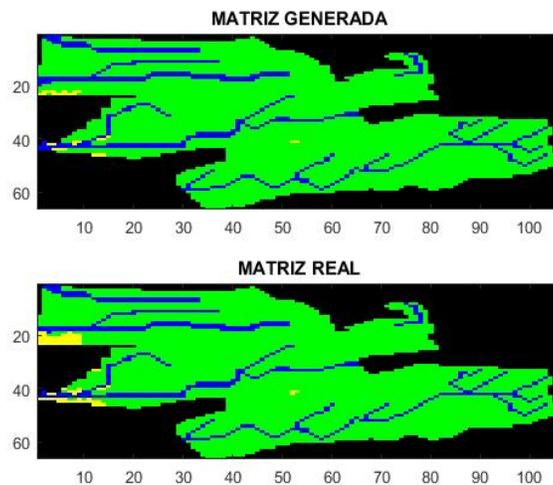


Figura 5.3: Comparación de la matriz generada con la matriz real en la primera iteración.

Fuente: Autores.

En la (figura 5.3) se observan las matrices del año 1970, la matriz generada es obtenida de la reproducción del autómata mientras que la matriz real es la equivalente al mapa clasificado de dicho año, aquí se observa que no son completamente iguales, ya que en la matriz generada algunas celdas que corresponden al estado de bosque(verde) deberían tener el estado de urbanización(amarillo).

Ahora, para la iteración dos, se toma como condición inicial la matriz obtenida de la iteración uno, es decir la matriz generada correspondiente al año 1970 y como $\Delta t = 9$ obtenemos la matriz correspondiente al año 1979.

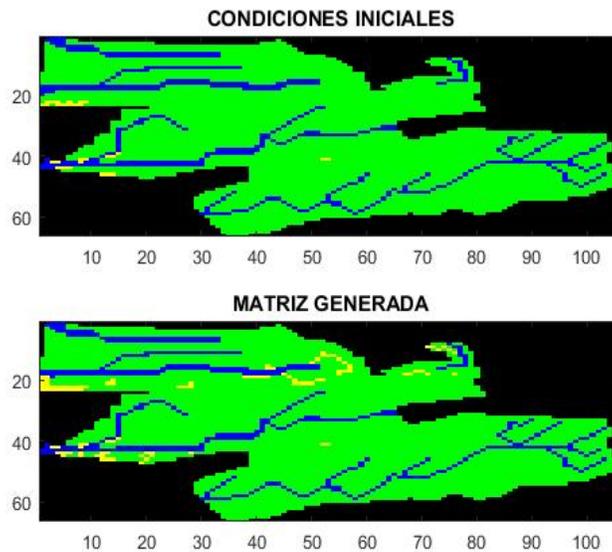


Figura 5.4: Reproducción de AC con condición inicial equivalente al mapa clasificado del año 1970.

Fuente: Autores.

En este caso se puede observar el incremento de la urbanización es decir como algunas celdas con el estado de bosque(verde) cambiaron al estado de urbanización(amarillo), además en este caso no se puede hacer la comparación con la matriz real ya que no contamos con el mapa clasificado del año 1979.

Luego, para la iteración tres, se toma como condición inicial la matriz obtenida de la iteración dos, es decir la matriz generada correspondiente al año 1979 y como $\Delta t = 9$ obtenemos la matriz correspondiente al año 1988.

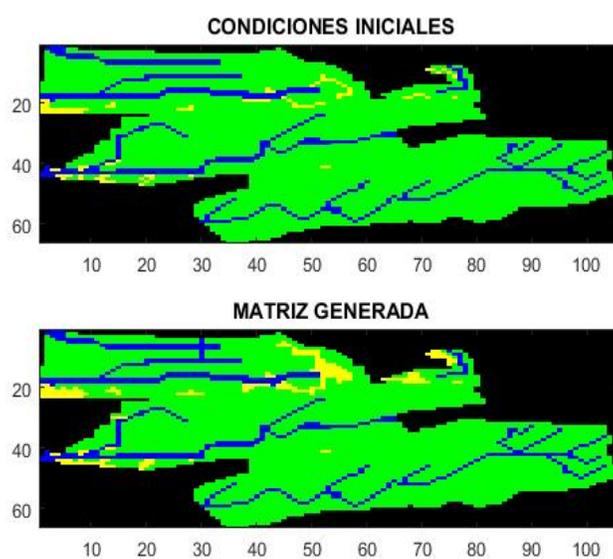


Figura 5.5: Reproducción de AC con condición inicial equivalente al mapa clasificado del año 1979.

Fuente: Autores.

De igual forma se observa el crecimiento no controlado del estado urbanización, a diferencia del caso anterior se puede hacer una comparación ya que se cuenta con el mapa clasificado del año 1988, en donde se observan que la precisión del modelo no es del 100 % (figura 5.6).

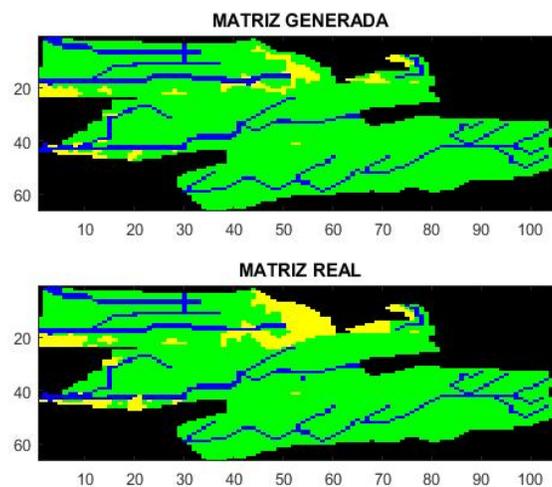


Figura 5.6: Comparación de la matriz generada con la matriz real en la tercera iteración.

Fuente: Autores.

Análogamente, para la iteración cuatro, se toma como condición inicial la matriz obtenida de la iteración tres, es decir se obtiene la matriz generada equivalente al año 1997.

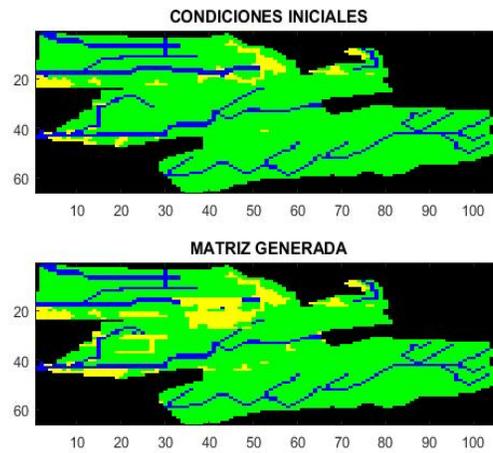


Figura 5.7: Reproducción de AC con condición inicial equivalente a la matriz generada del año 1988.

Fuente: Autores.

Del mismo modo obtenemos la matriz generada equivalente al año 2006.

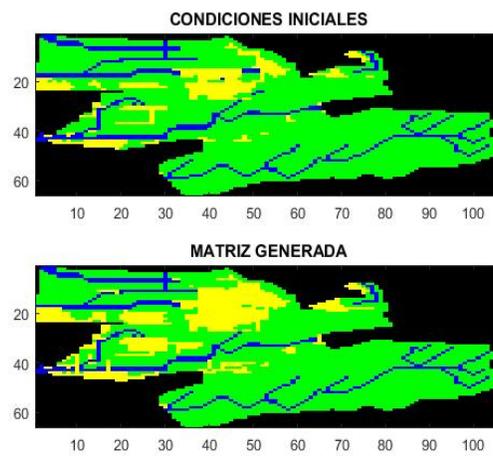


Figura 5.8: Reproducción de AC con condición inicial equivalente a la matriz generada del año 1997.

Fuente: Autores.

En este caso, la matriz generada corresponde al año 2006 y observamos gráficamente la comparación con el mapa clasificado equivalente a dicho año (figura 5.9)

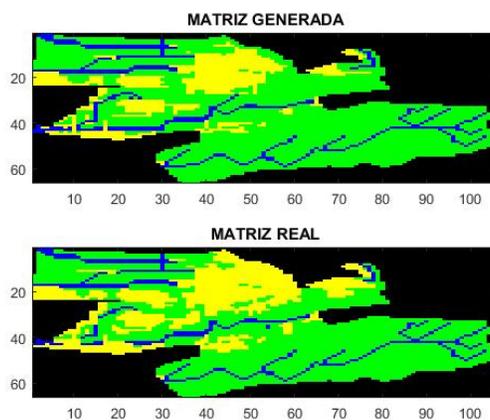


Figura 5.9: Comparación de la matriz generada con la matriz real en la quinta iteración.

Fuente: Autores.

Igualmente, obtenemos la matriz generada al año 2015

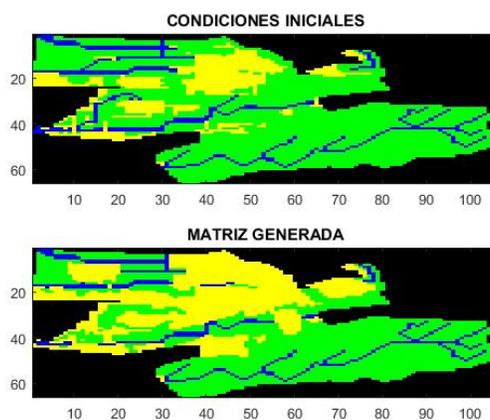


Figura 5.10: Reproducción de AC con condición inicial equivalente a la matriz generada del año 2006.

Fuente: Autores.

CONCLUSIONES

El modelo matemático y computacional construido con la herramienta de autómatas celulares, fue basado en la reclasificación de aerofotografías disponibles de la zona de estudio, dicho modelo nos permitió interpretar los cambios de cobertura que ha tenido la zona a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta que en el mapa clasificado del año 1961 no se encontraba presencia de urbanización que afectara las zonas verdes y los cuerpos de agua, notando evidentemente la relación inversa que existe entre el crecimiento de la población con las zonas verdes y zonas de agua, es decir que a medida que aumentó la población a partir del año 1970 empezaron a disminuir las zonas de bosque.

Además, el modelo computacional encontrado nos genera unos resultados muy acertados, aunque no precisos en comparación con los mapas clasificados que se tienen de los distintos tiempos.

Por último, una de las principales limitantes para el desarrollo de este documento fue el acceso a la información disponible de la zona de estudio, ya que las entidades locales encargadas del manejo de esta información no contaban con estudios fotográficos o satelitales en distintos instantes de tiempo.

TRABAJO FUTURO

Según los alcances obtenidos en este proyecto y con el fin de darle continuidad al trabajo se proponen realizar las siguientes actividades:

- Construir el algoritmo para la reproducción del autómata celular utilizando las reglas obtenidas del software WEKA propuestas en este documento.
- Calibrar y validar el modelo de autómatas celulares construido en esta investigación.
- Determinar la sostenibilidad y umbral de resiliencia con base al modelo de autómatas celulares construido en este proyecto.

Bibliografía

- [1] Santos, A.C.,2010. Implementación de un modelo de autómata celular para el pronóstico de la precipitación espacial. caso de estudio ciudad de Bogotá (Colombia). Universidad nacional de Colombia, tesis de maestría en recursos hidráulicos.
- [2] Franco, A., 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”. Universidad nacional de Colombia, tesis de maestría en recursos hidráulicos.
- [3] Wolfram, S., 2002. A New Kind of Science.
- [4] Packard, N. H., Wolfram, S., 1985. Two-dimensional cellular automata. J. Statist. Phys. Volumen 38. pp 901–946.
- [5] Ponce, E., 2004. Humedales designación de sitios Ramsar en territorios de grupos étnicos en Colombia.
- [6] Ramsar,1971. Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como habitat de aves acuáticas. París: UNESCO.
- [7] Masten, A.S. y Powell, J.L. (2003). A resilience framework for research, policy, and practice. En S.S. Luthar (Ed.), Resilience and

- vulnerability. Adaptation in the context of childhood adversities (pp. 1-25). Cambridge, RU: Cambridge University Press
- [8] Liu J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A.N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., W. Provencher, Redman, C.L., Schneider, S.H., y Taylor, W.W. 2007. Complexity of Coupled Human and Natural Systems. Science.
- [9] Ilachinski, A., 2001. Cellular automata: a discrete universe. World Scientific. 808 pp. Weimar, J. 1997. Simulation with cellular automata. Logos Verlag Berlin. 199 pp.
- [10] Almeida, C. M; Batty, M; Vieira, A; Câmara, G; SoaresFilho, B. S; Cerqueira, G. C. y Lopes P. (2003). Stochastic Cellular Automata Modeling of Urban Land Use Dynamics: Empirical Development and Estimation.
- [11] White, R y Engelen G. (2000): "High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems", Computers, Environment and Urban Systems, 24, pp. 383-400
- [12] Karafyllidis, I., Thanailakis, A., 1997. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. Ecological Modelling. Volumen 99. pp 87- 97.
- [13] Muñoz, J.D., 1996. Autómatas Celulares Y Física Digital, en: Memorias del Primer Congreso Colombiano de NeuroComputación. Santafé de Bogotá, D. C.: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 28 p. ISBN 958-9205-17-8.
- [14] Chen, W. 2004. Cellular Automata and Artificial Intelligence. En Ecohydraulics Modelling. Ed Taylor & Francis Group. Londres
- [15] Jiménez, A., Posadas, A., Marfill, J.M., 2000. A probabilistic seismic hazard model based on cellular automata and information theory. Nonlinear Processes in Geophysics. Volumen 12. pp 1-16.
- [16] Hugo franco,2010., Autómatas Celulares Octava sesión. Universidad central.

-
- [17] Figueroa, W.C., y, Garay D.E.,2015. Diseño de un modelo basado en automatas celulares para el cambio del uso del suelo en Bogotá. Universidad católica de Colombia, tesis de pregrado para optar el título de ingeniero civil.
- [18] Gardner, M., 1970. Mathematical Games - The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game Life. Scientific American. Volumen 223. pp 120-123.
- [19] Obregón,N., 2004. Notas de clase: Seminario II: sistemas de inteligencia artificial. Mitchell T. 1997. Machine Learning. McGraw Hill, New York (1997).
- [20] Rincón, L.M, y, Rueda, H., 2018. Transformación de las Microcuencas hídricas del oriente urbano del municipio de Neiva por el impacto del crecimiento urbanístico a partir del año 1961.
- [21] Muñoz, F.R., 2013. Música con Autómatas Celulares. Universidad nacional de Colombia, tesis de maestría en Ciencias - Matemáticas.
- [22] Padilla, Oswaldo., 2015. Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. Revista ciencias espaciales, volumen 8.
- [23] Gorostiaga, G., Autómatas celulares y su aplicación. Revista de información tecnología y sociedad.
- [24] Wolfram, S.,1986. Theory and Applications of Cellular Automata.
- [25] Vizcaino, P.A., 2008. Aplicación de técnicas de inducción de árboles de decisión a problemas de clasificación mediante el uso de Weka. Fundación universitaria konrad Lorenz.
- [26] Cano, A, y, Rojas, A., 2016. Autómatas celulares y aplicaciones. Revista iberoamericana de educación matemática.
- [27] Reyes, D.A., 2011. Descripción y aplicaciones de los autómatas celulares. Universidad autónoma de Puebla.
- [28] Aguilera Benavente., 2006. Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. Universidad de Granada, España.

-
- [29] Lopez, M.S. Automatas celulares bidimensionales. Revista de información tecnológica y sociedad.
- [30] Hernandez, L; Martin del Rey, y, Rodriguez, G., 2002. Aplicaciones de los autómatas celulares a la generación de bits. Universidad de Salamanca.
- [31] Qiuwen Chen, Fei Ye and Weifeng Li., 2009. Cellular-automata-based ecological and ecohydraulics modelling. Article in Journal of Hydroinformatics.
- [32] Romano Foti, Manuel del Jesusa, Andrea Rinaldo, and Ignacio Rodriguez-Iturbe, 2012. Hydroperiod regime controls the organization of plant species in wetlands.
- [33] Manual de la Convención de Ramsar., 1971. Secretaría de la Convención de Ramsar – 2006. González, J.A., Minería de Datos. Universidad Politécnica de Puebla UPP.
- [34] Muto, T.J., 2015. Modelo de predicción de escenarios para sistemas ambientales complejos basado en autómatas celulares y modelo basado en agentes. Pontificia universidad Javeriana. Tesis de maestría en ingeniería de sistemas y computación.
- [35] Caligaris, M, y, Rodriguez, G., 2010. Simulaciones computacionales: autómatas celulares. Universidad Tecnológica Nacional de Argentina.
- [36] Chuvieco. E. 2002. Teledetección ambiental. Editorial Ariel. España.
- [37] Lopez, J.M., 2010. Simulador de flujo de tráfico basado en autómatas celulares. Universidad Carlos III de Madrid.

ANEXOS

PATRONES.m

```
clear all
clc
tic
MATRIZ_CLASIFICADA=xlsread('INFO_CLA','C_1961','A1:DB66
    ');
[filas ,columnas]=size(MATRIZ_CLASIFICADA);
NUMERO_FILAS_TABLA=(filas -2)*(columnas -2);
PLANTILLA_MOORE=NaN;
k=1;
    for i =2:filas -1
        for j =2:columnas -1
            PLANTILLA_MOORE(k , 1)=MATRIZ_CLASIFICADA(i -1,j -1);
            PLANTILLA_MOORE(k , 2)=MATRIZ_CLASIFICADA(i -1,j );
            PLANTILLA_MOORE(k , 3)=MATRIZ_CLASIFICADA(i -1,j +1);
            PLANTILLA_MOORE(k , 4)=MATRIZ_CLASIFICADA(i , j -1);
            PLANTILLA_MOORE(k , 5)=MATRIZ_CLASIFICADA(i , j );
            PLANTILLA_MOORE(k , 6)=MATRIZ_CLASIFICADA(i , j +1);
            PLANTILLA_MOORE(k , 7)=MATRIZ_CLASIFICADA(i +1,j -1);
            PLANTILLA_MOORE(k , 8)=MATRIZ_CLASIFICADA(i +1,j );
            PLANTILLA_MOORE(k , 9)=MATRIZ_CLASIFICADA(i +1,j +1);
            k=k +1;
        end
    end
```

```

    end
end
xlswrite('TABLA_DE_PATRONES_t1.xlsx','PLANTILLA_MOORE','
    Hoja1','A2');

```

ELIMINAR-REPETIDOS.m

```

MATRIZ_CLASIFICADA_t1_CF=xlsread('
    TABLA_DE_PATRONES_t1_CF','hoja1','A2:J14645');
[nf,ncol]=size(MATRIZ_CLASIFICADA_t1_CF);
p=1;
MATRIZ_INTELIGENTE=NaN;
MATRIZ_INTELIGENTE(1,1:10)=MATRIZ_CLASIFICADA_t1_CF
    (1,1:10);
SUMATORIA=0;
for i=1:nf
    m=NaN;
    for k=1:p
        if MATRIZ_CLASIFICADA_t1_CF(i,1:10)==
            MATRIZ_INTELIGENTE(k,1:10);
            m(k,1)=1;
        else
            m(k,1)=0;
        end
    end
    if sum(m)>0
        SUMATORIA(1:p,1)=SUMATORIA+m;
    else
        MATRIZ_INTELIGENTE(p+1,1:10)=
            MATRIZ_CLASIFICADA_t1_CF(i,1:10);
        p=p+1;
        SUMATORIA(p,1)=1;
    end
end
end

xlswrite('PATRONES_FINAL.xls',MATRIZ_INTELIGENTE,'
    Hoja1','A2');

```

AUTOMATA.m

```

clear all
clc

tic
CONDICION_INICIAL=xlsread('INFO_CLA','C_1961','A1:DB66'
    );
[filas ,columnas]=size(CONDICION_INICIAL);
REGLAS= xlsread('PATRONES_FINAL','A2:J864');
[Nf,Nc]=size(REGLAS);
Temporal=zeros(filas ,columnas);

for i=2:filas-1
    for j=2:columnas-1

        k=0;
        for ki=i-1:i+1
            for kj=j-1:j+1
                if CONDICION_INICIAL(ki ,kj)==999
                    k=1;
                end
            end
        end
        if k==0
            for m=1:Nf
                suma=sum(REGLAS(m,1:Nc-1)-[
                    CONDICION_INICIAL(i-1,j-1),
                    CONDICION_INICIAL(i-1,j),
                    CONDICION_INICIAL(i-1,j+1) ,...
                    CONDICION_INICIAL(i ,j-1),
                    CONDICION_INICIAL(i ,j),
                    CONDICION_INICIAL(i ,j+1) ,...
                    CONDICION_INICIAL(i+1,j-1),CONDICION_INICIAL(i
                    +1,j),CONDICION_INICIAL(i+1,j+1)]);

                if suma==0

```

```
                Temporal(i , j)=REGLAS(m, Nc) ;  
            else  
                Temporal(i , j)=CONDICION_INICIAL(i ,  
                j) ;  
            end  
        end  
    else  
        Temporal(i , j)=CONDICION_INICIAL(i , j) ;  
    end  
end  
end  
xlswrite('MatrizResultado.xlsx', Temporal, 'Hoja1', 'A1') ;  
toc  
for i=1:filas  
    for j=1:columnas  
        if CONDICION_INICIAL(i , j)==999  
            CONDICION_INICIAL(i , j)=0 ;  
            Temporal(i , j)=0 ;  
        end  
    end  
end  
end  
my_map=[0 0 0 ;  
        0 1 0 ;  
        1 1 0 ;  
        0 0 1] ;  
  
figure('Name', 'RESULTADOS')  
  
subplot(2,1,1)  
colormap(my_map)  
imagesc(CONDICION_INICIAL)  
title('CONDICIONES_INICIALES')
```

```
subplot(2,1,2)  
colormap(my_map)  
imagesc(Temporal)  
title('MATRIZ_GENERADA')
```