

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL PAISAJE

FECHA DE RECEPCIÓN: 21-11-24 / FECHA DE ACEPTACIÓN: 01-03-25

Joan Manuel Montealegre Hermosa

MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL E INVESTIGADOR DEL PROYECTO ONDAS MINCIENCIAS USCO

Correo electrónico: joan.montealegre@usco.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6956-3783>

RESUMEN

El presente trabajo se realiza recopilaciones de datos, descripciones, modelizaciones y simulaciones de las interrelaciones dinámicas entre la variabilidad climática y la evolución del paisaje que sustenta el parque Arqueológico de San Agustín Huila y sus nexos con las actividades entrópicas que ocurren en su entorno cercano constituido por las veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda, con el fin conocer la dinámica de su índice de vulnerabilidad y en consecuencia la sostenibilidad ambiental de esta zona de vida. Lo cual es motivado porque dicho paisaje protege un patrimonio cultural de la Nación Colombiana, declarado como tal por la UNESCO en 1995.

Palabras Clave: Antrópico; Parque Arqueológico de San Agustín; Variabilidad climática; Paisaje; Exposición; Sensibilidad; Capacidad adaptativa; Índice de vulnerabilidad.

ABSTRACT

The present work is carried out data compilations, descriptions, modeling and simulations of the dynamic interrelationships between climate variability and the evolution of the landscape that sustains the Archaeological Park of San Agustin Huila and its links with the entropic activities that occur in its nearby environment constituted through the Mesitas, La Estrella and New Zealand paths, in order to know the dynamics of their vulnerability index and consequently the environmental sustainability of this life zone. Which is motivated because said landscape protects a cultural heritage of the Colombian Nation, declared as such by UNESCO in 1995.

Keywords: Anthropic; San Agustin Archaeological Park; Climate variability; Landscape; Exposure; Sensitivity; Adaptive capacity; vulnerability Index.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo trata de aproximarnos al conocimiento de las afectaciones observadas del clima sobre el paisaje que sustenta el Parque Arqueológico de San Agustín y sus relaciones con la actividad socioeconómica que se realiza en su entorno próximo; puesto que se trata de una dinámica con vínculos prácticos y teóricos de evidente trascendencia para sostenibilidad cultural, social, ecológica, económica de uno de los lugares más significativos del Huila y Colombia. Con ayudas de simulaciones con modelo construidos con paquetes computacionales NETLOGO, WEKA; el Programa R, para graficar el comportamiento de temperatura con datos registrados por el IDEAM de la estación del parque Arqueológico de San Agustín durante del periodo comprendido de los años 2000 al 2020; El QGIS para identificar la cobertura vegetal por medio de registro satelital y su proyección hasta el año 2025 sobre la dinámica de la cobertura vegetal con énfasis en cobertura de bosque muy saludable, por ultimo realizar una estimación del índice de vulnerabilidad a que está sometida la población de la zona y el paisaje. lo que permitió ajustar los programas para los modelos de simulación utilizado en este proyecto de investigación.

El cambio climático genera variabilidad bruscas en la temperaturas y régimen de lluvias que perturban el ecosistema (Alteri, Miguel A., 2013) comprometiendo la vida en su conjunto, en cuanto afecta diversidad vegetal, complejidad del paisaje, manejo del suelo y existencia del agua. En un estudio previo sobre la misma región (Serrano Vásquez, 2016) se propone potenciar la capacidad de resistir y recuperar, frente a la incertidumbre de estos fenómenos de variabilidad climática, generar turismo cultural sostenible que priorice el bienestar de la comunicad que habita esta zona y que sea compactibles con el denominado agroturismo.

Según lo propuesto el en Panel Intergubernamental sobre el cambio climático, por sus siglas en inglés (IPCC, 2014) pagina 572, evaluamos cambio climático debido a la variabilidad climática como función de la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa de sus habitantes.

En este estudio sobre cambio climático resultó relevante para conocer la evolución del paisaje (Gavier, 2018) para simular la dinámica en la transformación del bosque a la agricultura (Brown, 2008), quien desarrolló un modelo espacio-temporal de la dinámica de maximización de la utilidad de cultivos frente a la cobertura forestal. La toma de decisiones de los agricultores se basa en preferencias personales que están representadas por la importancia relativa de los diversos factores que influyen en los agricultores en la toma de decisiones sobre el uso de la tierra.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

El parque Arqueológico de San Agustín es un patrimonio cultural de la humanidad

desde 1995, su entorno próximo está constituido por tres veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda; este entorno ubicado en el macizo colombiano tradicionalmente se ha caracterizado por ser un territorio verde. Pero en los últimos años se percibe un deterioro ambiental que pone en peligro las crecientes actividades ecoturísticas, agroecológicas y factores que afectan la calidad de vida de los habitantes nativos. Este artículo corresponde al proyecto de tesis (Montealegre, 2021) y se relaciona en el numeral 13 de los Objetivos del Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU en la Agenda 2030, en lo que se refiere Acción por el Clima y conservación del bosque. Se ha desarrollado la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo afecta la variabilidad climática y actividades antrópicas el entorno próximo del parque arqueológico de San Agustín, Huila?

El objetivo general se definió como: “Estimar los Riesgos causados por la variabilidad climática y las prácticas socioculturales adversas que afectan la sostenibilidad ambiental a mediano plazo del paisaje constituido por el entorno próximo al Parque Arqueológico de San Agustín Huila, como zona de vida”; a través de los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el estado del paisaje del entorno próximo del Parque Arqueológico de San Agustín Huila.
- Construir un modelo para cobertura vegetal y afectaciones climáticas sobre paisaje del entorno próximo al parque Arqueológico de San Agustín
- Establecer el Índice de Riesgo derivado de los impactos climáticos y antrópicos que afectan la zona de vida de este entorno próximo al Parque Arqueológico de San Agustín Huila.

La ejecución de este proyecto de investigación se justificó porque este paisaje es vulnerable a la variabilidad climática y antrópica, pues el aumento de las temperaturas afecta la existencia de nacederos, los sombríos, los senderos, ambientes apropiados para la vida, afecta la calidad de los cultivos y provoca la proliferación de malas hierbas y plagas. Los cambios en los regímenes de lluvias aumentan las probabilidades de fracaso de las cosechas.

La variabilidad climática es real y amenaza con socavar la sostenibilidad social y ambiental de este patrimonio cultural de la humanidad, en particular la del paisaje que soporta el ecoturismo y turismo cultural en esta región de Sur del Huila, por esta razón la modelización de la evolución de la cobertura vegetal es muy importante para crear estrategias de mitigación sobre los efectos negativos del fenómeno del niño y de la niña.

3. REFERENTES TEÓRICOS

3.1 MARCO CONCEPTUAL

Es fundamental aclarar los siguientes conceptos tomados del IPCC 2014, los cuales lo

relacionamos a seguir:

Adaptación: Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos.

Antrópico: hace referencia al efecto ambiental provocado por la acción del hombre.

Exposición: La presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.

Impactos: Efectos en los sistemas naturales y humanos, los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos.

Paisaje: Entorno geográfico superficial, integrado por componentes naturales y complejos de diferente rango taxonómico que es formado bajo la influencia de los procesos naturales y de la actividad modificadora del hombre.

Peligro: Acaecimiento potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales.

Riesgo: Potencial de consecuencias en que algo de valor está en peligro con un desenlace incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales sucesos o tendencias. Los riesgos resultan de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro.

Sensibilidad: Es el grado en el que un sistema es potencialmente modificado o afectado por un disturbio, interno, externo o un grupo de ellos. La medida determina el grado en el que un sistema se puede ver afectado por un estrés, son las condiciones humanas y ambientales que pueden empeorar o disminuir los impactos por un determinado fenómeno.

Variabilidad climática: Es una medida del rango en que los elementos climáticos, como temperatura o lluvia, varían de un año a otro.

Vulnerabilidad: Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.

3.2 ESTADO DEL ARTE.

Estudiamos con detalle los siguientes documentos que nos sirven como antecedentes para este estudio del paisaje del entorno del Parque de San Agustín:

En (Villalba Corredor & Malagón, 2011) se hace un estudio en el parque arqueológico como un lugar mágico con estructuras funerarias, elementos escultóricos como guardines e íconos para la comunidad de la región, como la Fuente de Lavapatatas.

En (Álvarez, Bateman, Quintero, & Ramírez, 2007) se hace un estudio relacionando la conservación en el Parque de San Agustín y su área de influencia, considerando los siguientes: la caracterización de las categorías de bienes arqueológicos que constituyen el Parque; el diagnóstico de su estado actual; los principios y criterios que rigen la conservación y los programas y proyectos que deben ser desarrollados en los próximos años.

En (Lasso Valderrama & Nelly Yunda, 2017) se realizó la evaluación y seguimiento al Plan de Ordenación y Manejo de la Microcuenca de la Quebrada el “Quebradón” ubicada en el municipio de San Agustín Huila, con el objetivo de verificar los avances y el porcentaje de cumplimiento de cada uno de los programas y proyectos planteados en dicho plan, las cuales garantizarían en gran medida la solución a los problemas ambientales presentados en su momento.

En (Perdomo Quesada & Polania Pérez, 2019) se implementó un modelo matemático y computacional utilizando autómatas celulares que permitió observar la dinámica en cuanto al cambio de cobertura que sufrió el complejo de humedales ubicado en el oriente de Neiva de un registro del año 1961, el cual muestran cambios de cobertura que evidencian el drástico decrecimiento que han tenido las zonas verdes y los cuerpos de agua.

En (Serrano Vasquez, 2016) se propone que el turismo cultural en los municipios de San Agustín e Isnos sea sostenible, involucrando a la comunidad con alternativas, tales como inversión social y evitar el sobrecupo de turistas, para controlar las afectaciones ambientales. De esta manera se beneficia directamente a la población de la región.

En (IPCC, 2014) este grupo Intergubernamental de expertos, establece una metodología para la estimación de la variabilidad climática, con base en la adaptación y la vulnerabilidad a que están sometidos los ecosistemas.

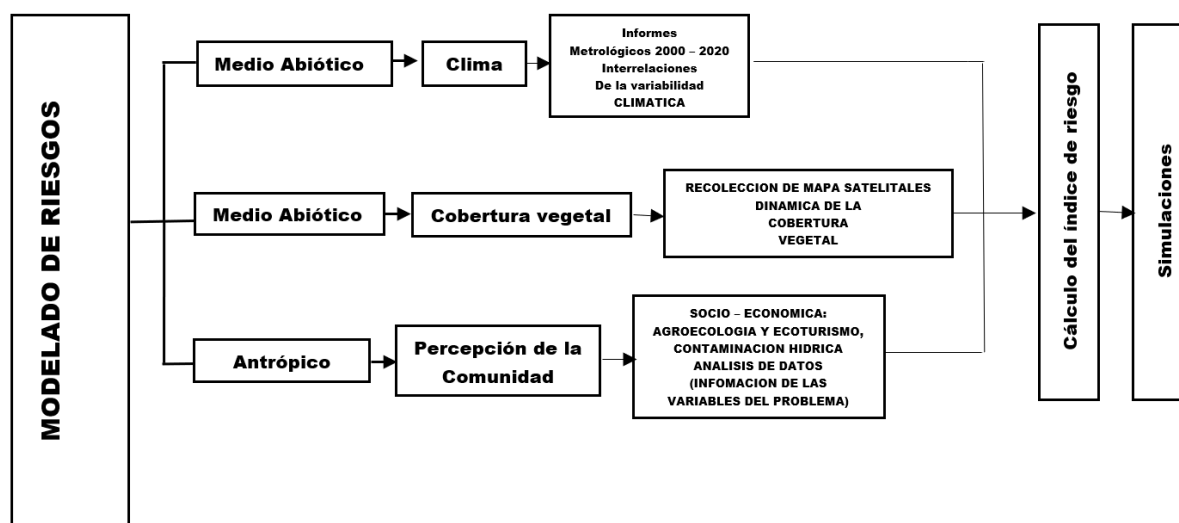
4. METODOLOGÍA

El Parque Arqueológico de San Agustín tiene coordenadas 1°55'00"N 76°14'00"O, está ubicado en un sector del Macizo Colombiano al sur del departamento del Huila, cubre un área de aproximadamente 78 hectáreas a una altitud de 1.730 m s. n. m., Distancia del casco urbano: 2.5 Kms. al Oeste del poblado de San Agustín y a 33 kilómetros de la población de

Pitalito en el Huila y a 220 kilómetros de la ciudad de Neiva, la capital departamental. Es considerado como la Necrópolis más grande del mundo y declarada por la Unesco como Patrimonio de la Humanidad

La metodología empleada en el presente trabajo de investigación es correlacional, descriptiva no experimental; en la que se recopilaban datos, se describieron y se realizaron modelizaciones dinámicas entre la variabilidad climática y la evolución de este paisaje con sus nexos antrópicos y aplicando la metodología descrita en la siguiente figura.

FIGURA 1. MODELO METODOLÓGICO



Se consultaron estudios previos sobre la historia, el estado de desarrollo socio-económico del entorno cercano. A partir de salida de campo se identificaron las variables del problema, se recopilaban y seleccionan datos a partir de: entrevistas a los habitantes, productores agropecuarios, operadores de turismo, comunidades nativas y sus organizaciones comunitarias. Para completar el diagnóstico y la visión de los actores sociales se aplicaron y procesaron 40 encuestas.

Para el estudio del paisaje y sus afectaciones climáticas se estudiaron datos de temperatura del IDEAM, plan de manejo del ICANH, conocimiento y evolución de los estados de la cobertura del suelo con imágenes satelitales de la zona comprendida por las veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda del Municipio de San Agustín.

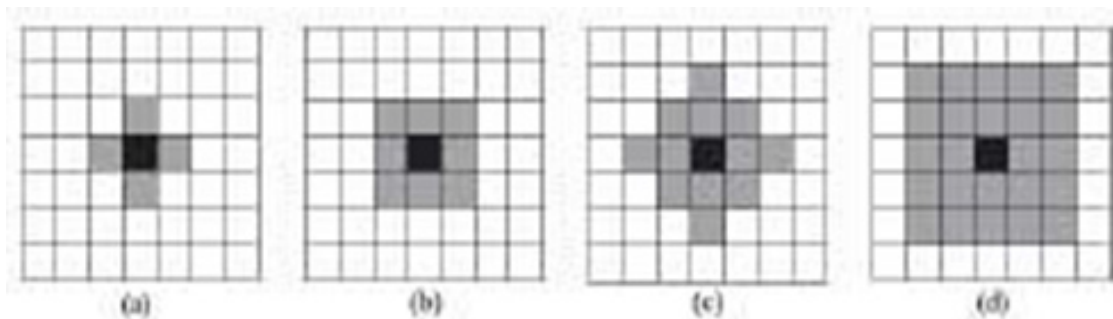
Como última etapa de este proceso y siguiendo la metodología propuesta por el IPCC 2014, se puede estimar el índice de Riesgo de vulnerabilidad actual y la simulación dinámica de sus escenarios posibles, según se adoptan conductas que favorezcan o desfavorezcan la ruta hacia la sostenibilidad ambiental.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 AUTÓMATAS CELULARES

Para describir la evolución del paisaje adoptamos el modelo de los autómatas celulares (AC), como sistema dinámico discreto compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados o valores. Estos estados pasan de uno a otro en instante tiempo discreto o con valores enteros que cuantifican intervalos regulares. Los cambios que presentan las celdas están determinados por una expresión matemática, que es sensible a los estados de las celdas vecinas, la cual se le conoce como regla de transición local. (Reyes Gómez, 2011).

FIGURA 2. VECINDAD DE AUTÓMATAS CELULARES



FUENTE. [HTTPS://SITES.GOOGLE.COM/SITE/MANUALNETLOGO/](https://sites.google.com/site/manualnetlogo/)

Función Local. Es la regla de evolución que determina el comportamiento del AC. Se conforma de una célula central y sus vecindades. Define como debe cambiar de estado cada célula dependiendo de los estados anteriores de sus vecindades. Puede ser una expresión algebraica o un grupo de ecuaciones (Reyes Gómez, 2011, pág. 4).

5.2 CADENAS DE MARKOV

Se representan mediante matrices de probabilidades de transición, designada por P_{ij} , (Scherer, 1972), representa la probabilidad de moverse del estado i al estado j en tiempo t , representado por la expresión $\pi_i(t)$, y la probabilidad de un cambio de uso de i a j durante un intervalo de tiempo $(t, t+1)$ como $P_{ij}(t, t+1)$, entonces la probabilidad de que esa parcela esté en una categoría de uso j en el tiempo $(t+1)$, será dada por la expresión probabilística siguiente:

$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^n \pi_i(t) * P_{ij}(t, t+1), \quad (1)$$

donde (n) es el número total de categorías de uso. Simplificando, se tiene

$$\pi(t+1) = \pi(t) * P. \quad (2)$$

$$\text{donde, } P_{ij} = P(X_{n+1} = s_j | X_n = s_i) \Rightarrow P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1k} \\ p_{21} & \cdots & p_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \cdots & p_{kk} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

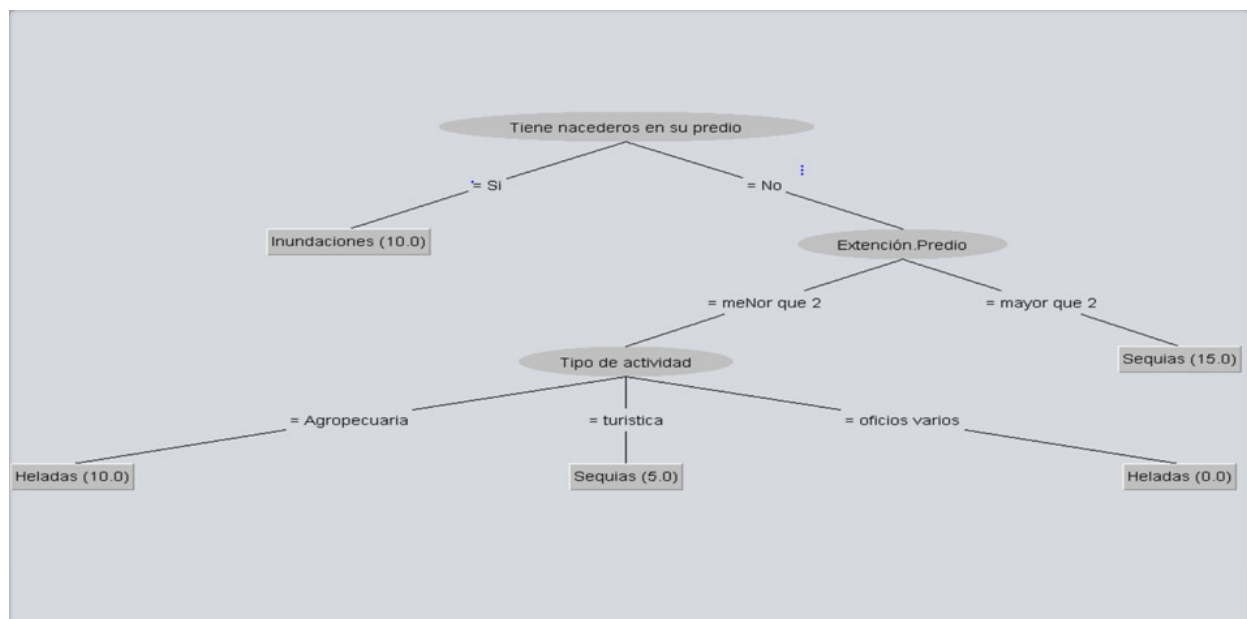
5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.1 PERCEPCIÓN DE LOS HABITANTES.

Para completar la percepción que tiene los habitantes de esta zona se aplicó una encuesta a 40 propietarios escogidos entre las 174 familias mencionadas por la Juntas de Acción Comunal que habitan en las veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda. Con los resultados de estas encuestas se construye el árbol de decisión de este problema, el cual se describe a continuación.

El árbol de decisión se construye maximizando el valor esperado en la categorización de las variables dependientes e independientes del problema. Este árbol se construye categorizando variables con las reglas “Si-Entonces”, particularmente se usa herramienta de minería de datos, en este caso mediante una encuesta hemos escogido el software WEKA para obtener un árbol de decisión para el problema de la sostenibilidad ambiental del paisaje que está en el entorno del Parque Arqueológico de San Agustín (Huila).

FIGURA 3. ÁRBOL DE DECISIÓN USANDO EL ALGORITMO J48 OBTENIDO DE WEKA



WEKA nos arroja los siguientes resultados, el cual generara un recuadro con el resumen del árbol generado, con respecto a las opiniones de los encuestados dice:

- Si una persona tiene nacederos en su predio entonces tiene problemas de

Inundaciones en sus cultivos.

- Si no tiene nacederos en su predio, entonces para conocer las afectaciones de vulnerabilidad climática, dependerá de la Extensión del predio.
- Si la Extensión del predio es menor a 2 HA, Entonces dependerá del tipo de actividad a la que se dedican.
- Si la actividad es agropecuaria tendrán problemas de heladas.
- Si una persona tiene nacederos en su predio entonces tiene problemas de Inundaciones en sus cultivos dependerá de la extensión del predio.
- Si la Extensión del predio es menor a 2 HA, Entonces dependerá del tipo de actividad a la que se dedican.
- Si la actividad es agropecuaria tendrán problemas de Heladas.
- Si la extensión de predio es mayor a 2HA, entonces tendrá problema de Sequia sus cultivos.

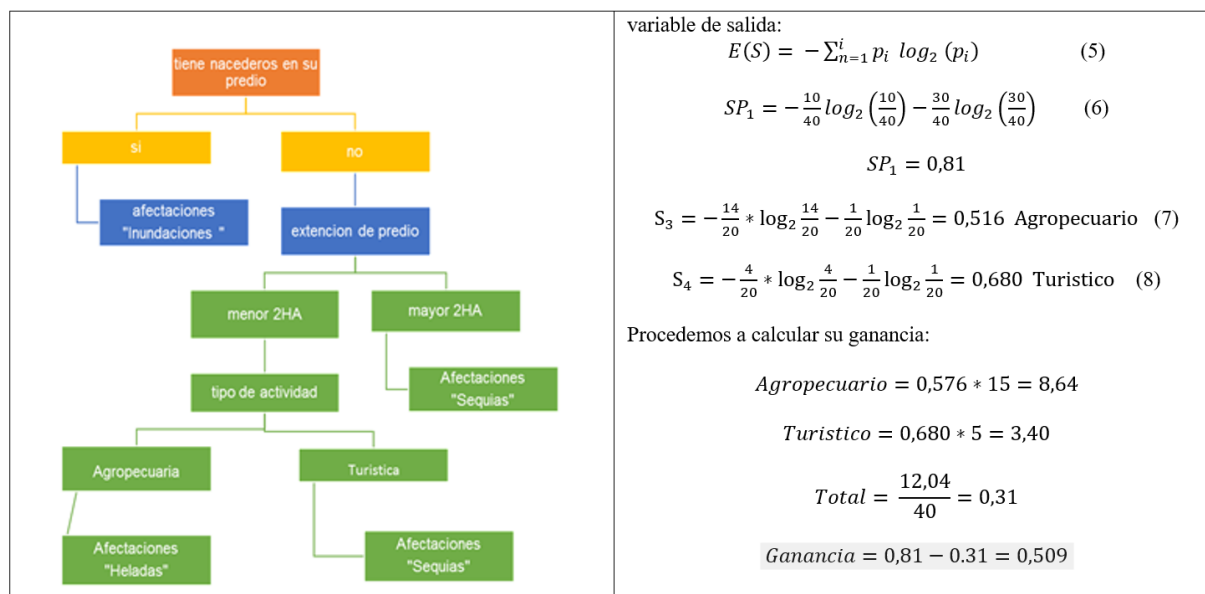
Se observa que el sistema experto categorizó como variable de salida la existencia de nacederos en los predios como es natural en los problemas de sostenibilidad de este tipo de paisajes.

La construcción de los árboles de decisión comienza con la pregunta: ¿Qué variable de entrada debe ser la raíz del árbol?. Cada variable de entrada es evaluada usando un examen estadístico para determinar qué tan bien esta variable clasifica los patrones de entrenamiento, por medio de la entropía. Para aclarar la percepción que tienen los habitantes de esta zona adoptamos el concepto de entropía, medida de la teoría de la información medida S , que se define como:

$$Entropia (S) = \sum_{i=1}^i -p_i \log_2(p_i) \quad (4)$$

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 y resulta el siguiente árbol de decisión, se calcula la entropía de la información, para ello se calcula la entropía de la variable de salida:

Figura 4. Ganancia de entropía con el Árbol de decisión



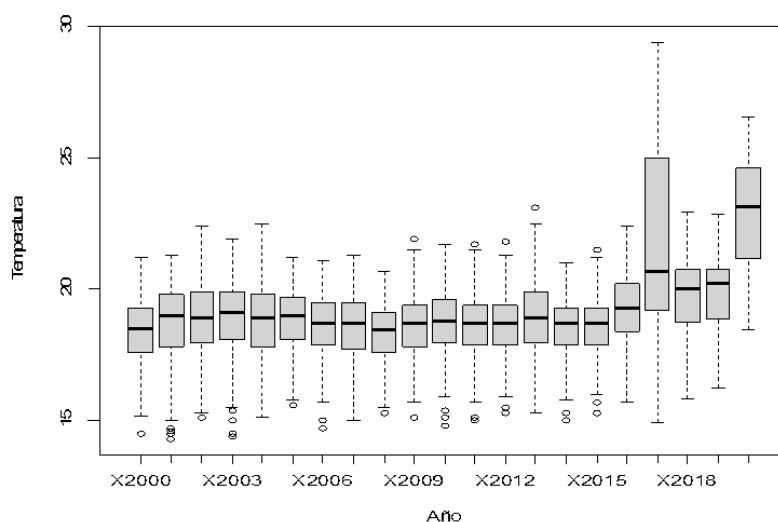
La ganancia de información es una propiedad estadística que mide que tan bien una variable dada separa los patrones de entrenamiento para seleccionar las variables candidatas en cada paso del crecimiento del árbol.

Primero nos centramos en el estudio de la minería de datos, para analizar las percepciones de la gente y así marcar en detalle los conceptos más importantes de esta metodología para clasificar la información basado en las encuestas como soporte para hallar el índice de Riesgo.

5.3.2 VARIABILIDAD CLIMÁTICA

A partir de datos climatológicos de los años 2000 y 2020 proporcionados por el IDEAM en la estación Parque Arqueológico, se realizó el siguiente análisis sobre la variabilidad climática afecta la zona de estudio. Se estudio la serie temporal X_t para analizar la temperatura media diaria, es decir, 7605 datos diarios.

FIGURA 5. DIAGRAMA DE CAJA POR AÑO



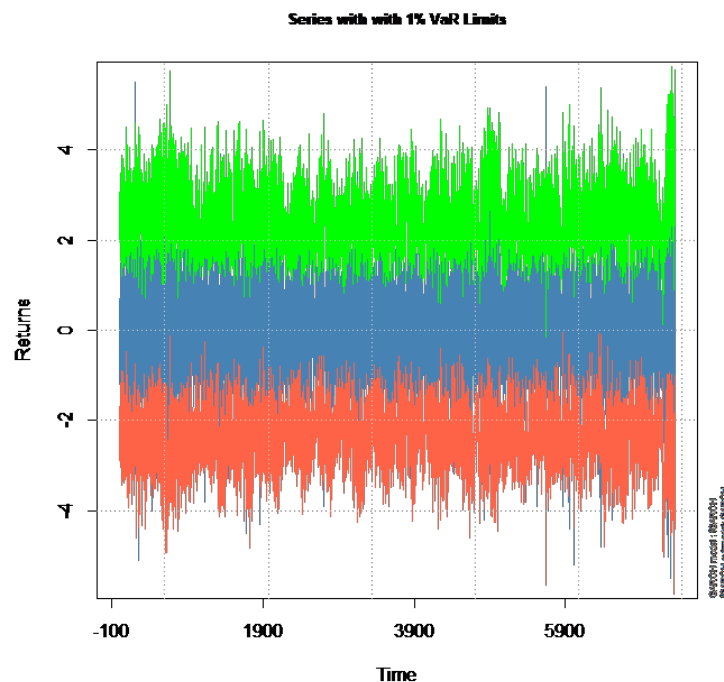
Al realizar una regresión lineal a los datos en cuestión se observa, que en promedio la temperatura diaria en la estación meteorológica del parque San Agustín es de 17.353°C con un incremento diario de 0.0006°C . En el año 2017 la variación de temperatura con respecto a la media fue de 1.65°C .

la mediana de la temperatura para cada año no varía drásticamente desde el año 2000 hasta el año 2016, presentando varios valores atípicos que expresan las bajas y altas temperaturas fuera de lo normal.

En los cuatros últimos años se ha presentado un incremento significativo en las temperaturas diarias, incluyendo la mediana por año, donde hay que tener en cuenta que el año 2017 se presentó el fenómeno del niño en el cual la temperatura media fue de 19°C .

Para ello apartir de la serie temporal X_t referente a la temperatura estudiamos las series de variaciones R_t , $R_{t+1}=X_t-X_{t-1}$. La variabilidad y volatilidad se observa en la siguiente figura 6 obtenida en con R-project a partir de los datos proporcionados por el IDEAM, la variabilidad es de color azul, y la volatilidad de color verde y rojo.

FIGURA 6. VOLATILIDAD Y VARIABILIDAD



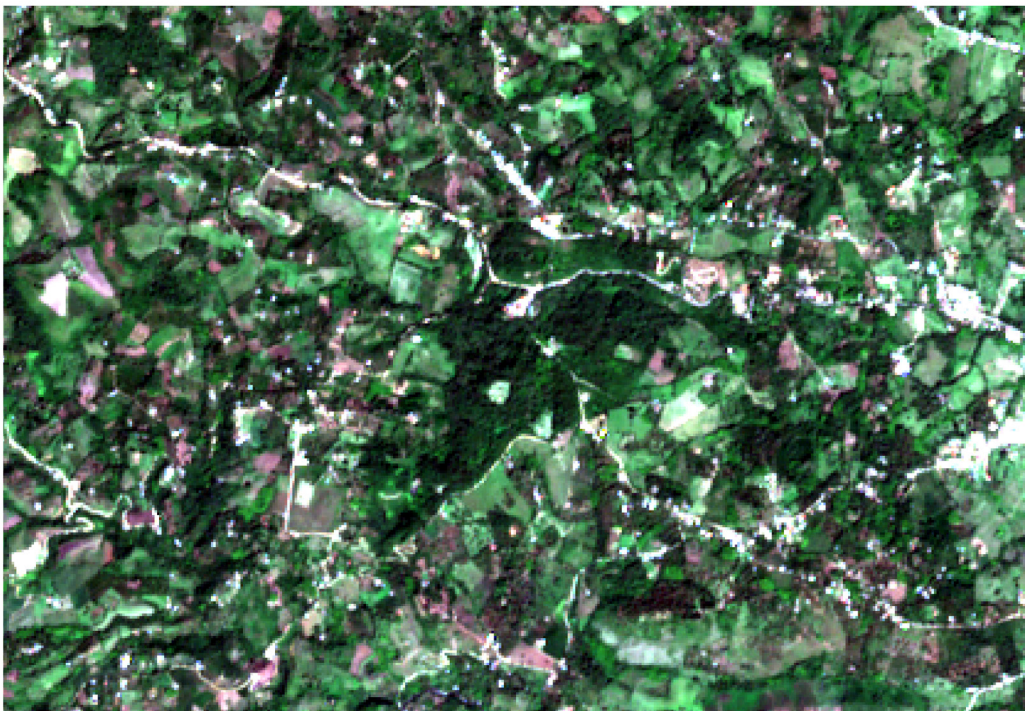
5.3.3 DINÁMICA DE LA COBERTURA VEGETAL

Con el propósito de analizar los patrones y tendencias de los cambios que tiene el material vegetativo alrededor del parque arqueológico de San Agustín, con especial énfasis las áreas que tienen mayor densidad de material vegetativo, se analiza la distribución espacial de distintas categorías de material vegetativo y su evolución durante los últimos años.

Donde se lleva a cabo un análisis multi-temporal de las coberturas del material vegetativo registradas en la imagen satelital seleccionada.

Las categorías de material vegetativo seleccionadas para las áreas de estudio se toman del NDVI - Índice de vegetación de diferencia normalizado.

Figura 7. Cobertura del material vegetativo



Donde el índice de vegetación cuyo resultado oscila entre -1 y 1, cuyos valores menores a 0,1 se interpreta como suelos desnudos o muerto, mayores a estos va en relación equivalente a la cobertura vegetal, indican la actividad de las diversas coberturas, así, los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que, los valores grandes (de 0,6 a 0,8), matorrales, bosque templado y tropicales, selva y actividad agrícola.

TABLA 1. CATEGORÍAS DEL ANÁLISIS MULTITEMPORAL

	Valor NDVI	Descripción
	Valor < 0	El material inanimado/muerto, por ejemplo: Carreteras, viviendas o las plantas muertas.
	0 < valor < 0.33	Material vegetativo no saludable.
	0.33 < valor < 0.66	Material vegetativo saludable.
	0.66 < valor	Material vegetativo muy saludable

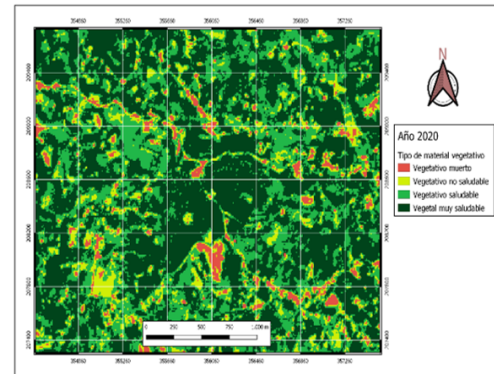
El resultado de estas operaciones permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinando los píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales.

Del estudio satelital se obtiene el siguiente resumen de categorías de los años 2015, 2017 y 2020, nos permite evaluar que material vegetativo han reemplazado a otros, además del

crecimiento o decrecimiento de cada uno, lo que se deriva del análisis estadístico.

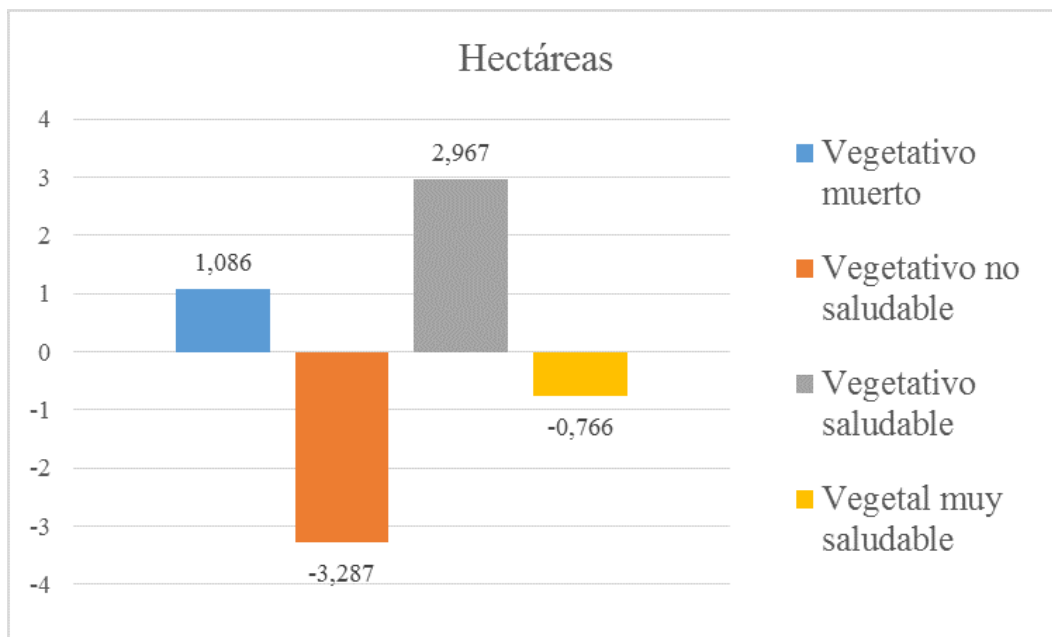
TABLA 2. TIPO DE MATERIAL VEGETATIVO Y MAPA MATERIA VEGETATIVO

	Extensión	Vegetativo muerto	Vegetativo no saludable	Vegetativo saludable	Vegetativo muy saludable
año	porcentaje				
2015	ha	1,873	11,944	25,235	45,771
	%	2,2	14,1	29,8	54,0
2017	ha	2,888	11,472	26,231	44,232
	%	3,4	13,5	30,9	52,1
2020	ha	2,959	8,657	28,202	45,005
	%	3,5	10,2	33,2	53,1



El análisis de ganancia y pérdida neta por categoría de uso del suelo 2015, 2017 y 2020 se muestra en la figura 8, con un incremento significativo del material vegetativo muerto (1,086 ha) y el área del material vegetativo saludable (2,967 ha), y pérdidas significativas en las coberturas de material vegetativo no saludable (3,287 ha) y material vegetativo muy saludable (0,766 ha).

FIGURA 8. GANANCIA Y PÉRDIDA NETA POR CATEGORÍA DE MATERIAL VEGETATIVO



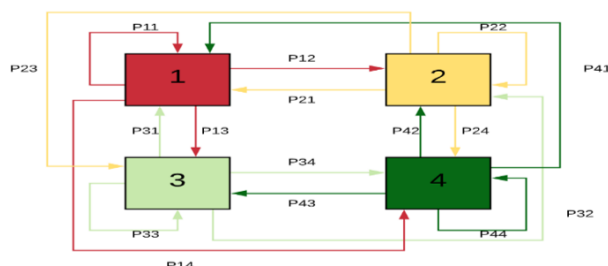
El análisis propuesto permite evaluar los factores territoriales que pueden aumentar los impactos o ganancias de cobertura vegetal. Los resultados del análisis de la evolución histórica del material vegetativo son instrumentales en la construcción de los modelos territoriales para escenarios futuros, en particular en la proyección de los usos del suelo en el escenario tendencial y para estimar los riesgos e índice de vulnerabilidad al cambio climático.

A partir de la clasificación del material vegetativo alrededor del parque, se simuló el cambio en la cobertura de material vegetativo, para lo cual, se consideró un escenario futuro

(2025). Se hace asumiendo que la dinámica de los cambios tiene un comportamiento que se puede explicar como un proceso estocástico, mediante una cadena de Markov

La probabilidad y transición de los estados de las áreas de material vegetativo a través de proceso de Markov:

FIGURA 9. DIAGRAMA DE TRANSICIÓN DE ESTADOS



$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^n \pi_i(t) * P_{ij}(t, t+1) \quad (10)$$

$$P_{ij} = P(X_{n+1} = s_j | X_n = s_i) \Rightarrow P = \begin{pmatrix} p_{11} & \dots & p_{1k} \\ p_{21} & \dots & p_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \dots & p_{kk} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Con las cuatro categorías de material vegetativo 1 (muerto), 2 (no saludable), 3 (saludable) y 4 (muy saludable). Si iniciamos con el estado (4) que puede ser considerado como el estado natural, no intervenido, el sistema puede cambiar al (3 y 2), un estado intervenido con actividades agrícolas o al estado (1), actividades urbanas y sus relacionados; también se puede dar el caso de que no cambie y permanezca en el (4). El proceso entonces se puede describir como una serie de valores de estados.

Que en síntesis produce la transición entre 2015 y 2022 de la cobertura en sus 4 categorías (Montealegre, 2021).

TABLA 3. MATRIZ DE PROBABILIDAD DE TRANSICIÓN ENTRE 2015-2020

Material vegetativo	Muerto	No saludable	Saludable	Muy saludable	Total
Muerto	0.3603	0.3136	0.2454	0.0806	0.9999
No saludable	0.1036	0.2469	0.492	0.1575	1
Saludable	0.0314	0.1389	0.4345	0.3952	1
Muy saludable	0.01	0.0519	0.2978	0.6403	1
Total	0.5053	0.7513	1.4697	1.2736	3.9999

En esta matriz el año de entrada 2015 se lee en las filas y el año de salida 2020 se lee en las columnas. De acuerdo con esta matriz de probabilidad de transición para un período de 5 años, las probabilidades de permanencia de superficie en cada tipo de material vegetativo son: del 64% para el material vegetal muy saludable, del 30% para el material vegetativo saludable, del 25% para el material vegetativo no saludable y del 36% para el material vegetativo muerto. Mostrando aumento de la cobertura muerta y disminución de la muy

saludable.

Para estudiar el índice deforestación Td futuro se obtuvo en la siguiente matriz de transición 2020 al 2025.

Material vegetativo	Muerto	No saludable	Saludable	Muy saludable	Total
Muerto	1,066	0,928	0,726	0,239	2,959
No saludable	0,897	2,137	4,260	1,363	8,657
Saludable	0,887	3,916	12,254	11,145	28,202
Muy saludable	0,449	2,337	13,405	28,815	45,005
Total	3,299	9,318	30,645	41,562	84,823

Los valores en la diagonal marcados en negrita representan las superficies que se mantendrán estables entre 2020 y 2025. Los valores transversales representan las superficies de intercambio entre las clases de uso de suelo.

$$Td = \left[\left(\frac{41,562}{45,005} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 \right] * 100\% = -1,579\%. \quad (12)$$

Esto significa una pérdida de material vegetativo muy saludable.

5.3.4 ÍNDICE DINÁMICO DE RIESGOS DE LA VULNERABILIDAD

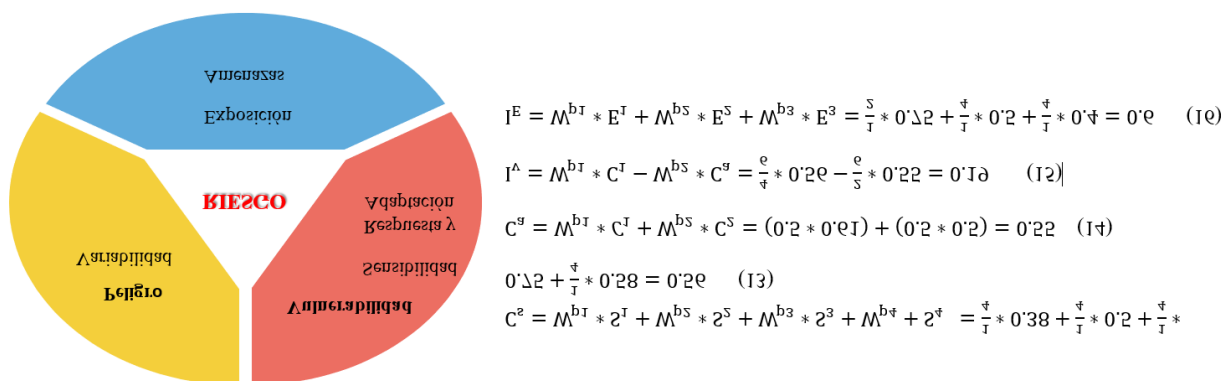
De los resultados anteriores se obtiene la siguiente Síntesis mostrada en la tabla 4 sobre los factores de riesgos que afectan la sostenibilidad de este paisaje:

Tabla 4. Síntesis de los tipos de riesgos con respecto a los factores

Tipo de riesgo	Grado de Exposición (GE)	Sensibilidad (S)	Capacidad de Adaptación (CA)
Económica	Pequeños propietarios no participan del turismo en la zona.	Pérdida de bosque nativo y crecimiento del material vegetativo muerto.	Variedad de café resistentes a plagas.
Socio-cultural	Pequeños propietarios sin programas para cobertura saludable.	Población sin servicio gas domiciliario.	Edad relativamente joven de los propietarios.
Ambiental	Pérdida de nacederos y cobertura vegetal.	Vertimiento de aguas servidas a las fuentes hídricas	Dominancia de nuevas variedades de cultivos.

Para establecer el Índice de Riesgo derivado de los impactos climáticos y antrópicos que afecta la zona de vida en el entorno próximo al Parque Arqueológico de San Agustín Huila, adoptamos la metodología de AR5 del (IPCC, 2014), la cual tiene en cuenta estas

afectaciones para la sobrevivencia de la cobertura vegetal muy saludable.



Por la variabilidad climática asumimos como índice de peligro del 25%, $I_p = 0.25$

$$R = \text{Riesgo} = \text{Peligro} * (\text{Vulnerabilidad} + \text{Exposición}) = 0.25 * (0.19 + 0.6) = 0.20 = 20\% \quad (17)$$

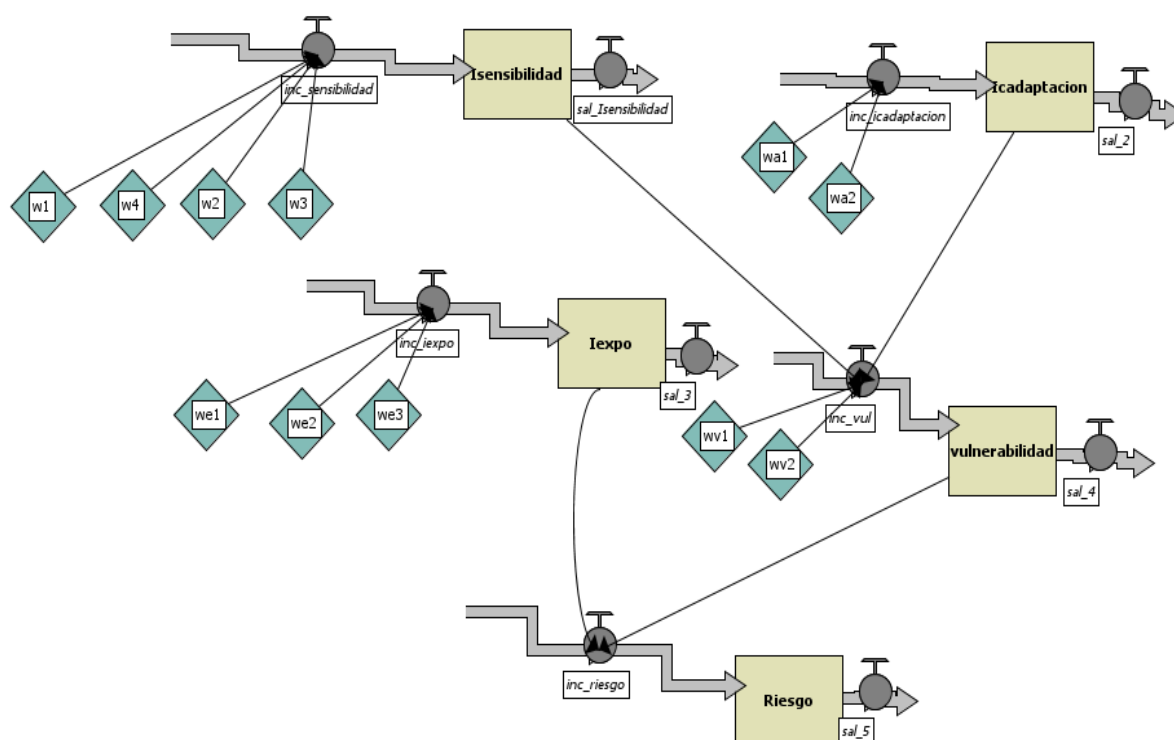
TABLA 5. TABLA DE CATEGORÍAS DE RIESGO

Riesgos	
Categorías	Rango
Baja	$0 < p < 0.2$
Baja media	$0.2 < p < 0.4$
Media	$0.4 < p < 0.6$
Media Alta	$0.6 < p < 0.8$
Alta	$0.8 < p < 1$

Adoptando como tabla 5. La tabla de categorías para estos riesgos, resulta un riesgo medio bajo, que no deja de ser significativo dada que la zona de estudio es potencialmente ecoturística y protege el un patrimonio cultural de la humanidad.

5.3.5 DINÁMICA PARA ESCENARIOS DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

De la expresión dinámica correspondiente al índice de vulnerabilidad, variando los pesos en dicha formula, podemos obtener un diagrama de sistema que oriente la comunidad de las veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda para la decisiones que conduzca a la sostenibilidad ambiental de este paisaje, según se adopte planes y programas interrelacionando voluntades de las organizaciones que existen en la comunidad y las instituciones del estado que tiene como fin de sostener con cobertura muy saludable el entorno del parque Arqueológico de San Agustín. Resulta la siguiente representación para escenarios futuros:

FIGURA 10. SISTEMA DINÁMICO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

6. CONCLUSIONES

El índice de vulnerabilidad sobre este paisaje de la región estudiada a la fecha esta en la categoría medio baja, significa que los agentes implicados aún pueden tomar decisiones que conduzcan al sostenimiento pleno de la cobertura muy saludable. La tendencia es hacia un deterioro de la cobertura vegetal muy saludable. Esto a su vez afecta a la sostenibilidad al parque Arqueológico, que se evidencia en el deterioro en la fuente del Lavapatas.

Entre los factores antrópicos se destacan las afectaciones en las familias residentes que poco están vinculadas a los servicios ecoturísticos, porque han sido desplazados por foráneos que compran las tierras a un alto costo.

Carencia de planes y programas cooperativos entre los agentes que intervienen para la sostenibilidad de este paisaje: Juntas Comunales, Comité de Cafeteros, El Cabildo Indígena, Alcaldía de San Agustín, el ICANH y la CAM.

REFERENCIAS

- Alteri, Miguel A. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones al cambio climático. Lima, Perú: Redagress.
- Álvarez, M. P., Bateman, C., Quintero, I., & Ramírez, P. (2007). Plan de manejo del parque arqueológico de Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología e.
- Brown, D. (2008). Spatio Temporal model Shifting cultivation and forest cover. Dynamical Environmental Development Economic , 643-671.
- CENICAFÉ. (2011). Variabilidad Climática y la floración del café en Colombia. Fondo Nacional del Café.
- Gallopin, G. (2003). Sostenibilidad y desarrollo sostenible: Un enfoque Sistémico, CEPAL Naciones Unidas, Santiago de Chile.
- Gavier, G. P. (2018). Modelos del paisaje y región . Universidad de Buenos Aires.
- IPCC. (2014). Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Ginebra, Suiza: IPCC.
- Lasso Valderrama, D. P., & Nelly Yunda, D. (2017). Evaluación y seguimiento al Plan de Ordenación y manejo de la microcuenca Quebrada el “Quebradón” San Agustín Huila. Pitalito, Huila: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Leff, E. (2012). Pensamiento ambiental latinoamericano: patrimonio de un saber para la sustentabilidad. UNAM, México.
- Montealegre, Joan (2021). Tesis maestría Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Surcolombiana.
- Olaya Amaya, Alfredo. (2003). Ecosistemas estratégicos del Huila. Neiva: Universidad Surcolombiana.
- Perdomo Quesada, K. Y., & Polania Pérez , P. (2019). dinámica para la sostenibilidad y resiliencia del humedal. Neiva, Huila: Universidad Surcolombiana.
- Pita Merino, L. (2007). Implementación de un modelo dinámico. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Reyes Gómez, D. A. (25 de Agosto de 2011). Descripción y aplicaciones de los autómatas celulares. FES Acatlán. Obtenido de Fernando Sancho Caparrini: http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_DARG.pdf.
- Santos Rocha, A. C. (2010). implementación de un modelo de autómata celular para Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Serrano Vasquez, C. E. (2016). Intereses, motivaciones y su importancia en el desarrollo de un turismo cultural sostenible. Turismo y patrimonio cultural, 561-564.
- U., W. (1999). Lenguaje de programación Netlogo , ccl.northwestern.edu/netlogo
- Villalba Corredor, L. S., & Malagón, A. (2011). Biodeterioro de la fuente de Lavapatatas, parque arqueológico de San Agustín-Huila. Colombia. Ge-conservación, n. 2, páginas 65-80.