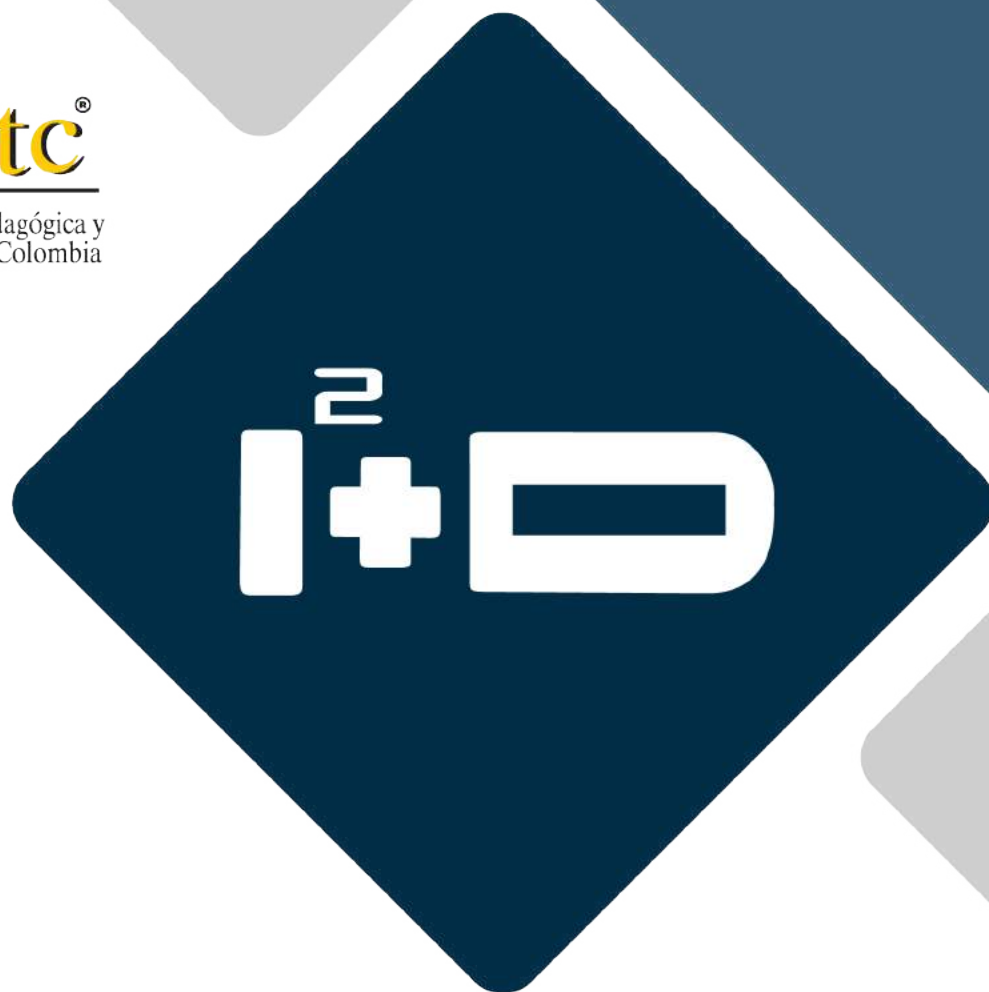




Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

REVISTA I2+D

Ingeniería, Investigación y Desarrollo

Vol. 20 - No. 1 Enero - Junio 2020

RECTOR

Óscar Hernán Ramírez

VICERRECTOR ACADÉMICO

Manuel Humberto Restrepo Domínguez

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

Enrique Vera López

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO

Eduardo Avendaño Fernández

DECANO FACULTAD

Jorge Enrique Espíndola Díaz

DIRECTOR / EDITOR

Jorge Enrique Espíndola Díaz

COMITÉ EDITORIAL Y CIENTÍFICO

Ph.D. Pedro Fabián Cárdenas Herrera
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D. Gabriel Peña Rodríguez
Universidad Francisco de Paula Santander

MSc. Andrés Fernando Jiménez López
Universidad de los Llanos

Ph.D. Jorge Julián Moreno Rubio
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Ph.D. Juan María Menéndez Aguado
Universidad de Oviedo

COMITÉ DE ARBITRAJE

Ph.D. Alexander Pérez Ruiz
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

MSc. Francisco Javier Ibargüen Ocampo
Universidad del Quindío

MSc. Heiner Castro Gutiérrez
Universidad del Magdalena

MSc. Nelson Javier Escobar Mora
Universidad Pontificia Bolivariana

MSc. Luis Carlos Olmos Villalba
Institución Universitaria Pascual Bravo

Ph.D. Carlos Arturo Ávila
Universidad de los Andes

Ph.D. José Ignacio Marulanda Bernal
Universidad EAFIT

Ph.D. Jeison Marín Alfonso
Universidad Pontificia Bolivariana

MSc. Ramiro Alejandro Plazas Rosas
Universidad del Valle

Esp. Carlos Gabriel Correa Chaparro
Fundación Universidad de América

MSc. Christian Ricardo Zea Forero
Pontificia Universidad Javeriana

MSc. Andrés Fernando Jiménez López
Universidad de los Llanos

MSc. William Fernando Álvarez Castañeda
Universidad Santo Tomás

MSc. Oscar Oswaldo Rodríguez Díaz
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Andrea Catalina Alvarado Fajardo
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Edgar Absalón Torres Barahona
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Luis Ariel Mesa Mesa
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

ASISTENTE EDITORIAL / CORRECTOR DE ESTILO

Lic. Giseth Alexandra López López

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Esp. Vivian Espíndola Carvajal

Correspondencia Canje y Suscripciones a nombre

de: Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo UPTC
Sogamoso-Boyacá, Colombia

Calle 4 Sur N° 15-134

Edificio Administrativo - Tercer Piso

Tel: (57+8) 770 5450 Ext. 2606

E-mail: revistaid@uptc.edu.co

DOI: <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la publicación.

ISSN 1900-771X e-ISSN 2422-4324

Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo



TABLA DE CONTENIDO

IMPACTO DEL VERTIMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LAVADO DE CARBÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL SUELO <i>Impact of dumping of wastewater from carbon washing on the physicochemical properties of the soil</i> Josselyn Azucena Aquino Montoro, Geraldine Paola García Martínez, Laura Valentina García Reyes	5
COMPORTAMIENTO DE LA QUÍMICA INORGÁNICA DE LOS CARBONES BITUMINOSOS EN EL SINCLINAL CHECUA – LENGUAZAQUE <i>Behavior of the inorganic chemistry of bituminous coals in the Checua - Lenguazaque syncline</i> David Alejandro Herrera Carvajal, John Elkin Rincón Bayona, Sandra Manosalva Sánchez	12
LÍNEAS ESTRATÉGICAS DE ACCIÓN SOSTENIBLE PARA LOS CENTROS DE ATENCIÓN MÉDICA DE LAS REGIONES DE COLOMBIA <i>Strategic lines of sustainable action for health care centers in Colombia regions</i> Karen Tatiana Valencia Rivero	23
COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL ENTRE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE IBAGUÉ Y EL REGLAMENTO NSR-10 <i>Comparison of the analysis and structural design between the Ibagué seismic microzoning and the NSR-10 regulation</i> Jean Paul Alejandro Toro Ruiz, Juan Sebastian Quintero Pinzón, Juan David Del Río Gaitán	29
MOL2ALL-VIDEOJUEGO PARA EL APRENDIZAJE DE LA ESTEQUIOMETRÍA: IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DEL JUEGO Y PERFIL DEL JUGADOR <i>Mol2all-videogame for the stoichiometry learning: identification of the characteristics game and player's profile</i> Víctor Hugo Medina García, Laura Marcela Rincón Pérez, Jorge Enrique Otálora Luna	40
MODELAMIENTO TERMOCINEMÁTICO 3D DE LA HISTORIA DE EXHUMACIÓN DEL SECTOR DE GUAYABETAL, KM 58 VÍA BOGOTÁ – VILLAVICENCIO: RELACIONES ENTRE CLIMA, RELIEVE Y TECTÓNICA <i>3D thermokinematic modeling of the exhumation history of the Guayabetal sector, km 58 vía Bogota– Villavicencio: relationships between climate, relief and tectonics</i> Daniel R. Hernández Chaparro, Mauricio A. Bermúdez, Greg Hoke, Helbert García Delgado, Silvia Machuca	47
AVANCES DE LA INFORMÁTICA FORENSE EN COLOMBIA EN LOS ÚLTIMOS CUATRO AÑOS <i>Advances in computer forensics in Colombia in the last four years</i> José Jhon Kennedy Bustamante Riaño	69

EDITORIAL

La Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, les transmite un cordial saludo, y se place en presentar a ustedes el resultado de la creación y/o profundización de nuevo conocimiento que los autores nos ofrecen en su continuo proceso de indagación, en aras de posicionar las diversas disciplinas de las ingenierías, tecnologías y saberes afines. En concordancia, han elaborado manuscritos de investigación, revisión y reflexión, que a continuación se esbozan.

El primer artículo de investigación expuesto en este volumen, recoge los impactos al suelo por la mala gestión del hombre, en especial, los provocados por el vertimiento de aguas residuales en el lavado de carbón sobre la capa orgánica. Continuando la temática del suelo; el segundo manuscrito, gracias a la Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, los autores revelan los porcentajes de la química inorgánica presente en los carbones del flanco occidental del sinclinal Checua – Lenguaque, de tal manera, que se pueda revisar el comportamiento de la química inorgánica para la coquización.

Por otro lado, el análisis hecho por la autora, en el tercer artículo, busca analizar la sostenibilidad en el campo hospitalario en diferentes partes del mundo y, recoger una serie de estrategias funcionales de diversos contextos para reducir el impacto ambiental. Desde otro punto de vista, los autores del cuarto manuscrito, esta vez, nos conducen a Ibagué y, comparten su investigación para determinar y comparar las variables requeridas para diseñar una estructura de concreto reforzado, acudiendo a la normatividad vigente como el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), estudio que permitió la microzonificación sísmica vigente de esta ciudad.

Ahora bien, desde el lado pedagógico y tecnológico, la investigación que se enmarca en el quinto artículo, privilegia la implementación de un videojuego formal que motiva el aprendizaje de los cálculos estequiométricos. Esta investigación persigue determinar los perfiles de los estudiantes en rol de jugadores, así como, las características que deberá tener del videojuego propuesto: Mol2All.

El sexto artículo, estudia la interacción entre el clima y la tectónica, de tal manera que, se recopile las edades termocronológicas existentes en el sector Guayabetal, km 58, vía Bogotá – Villavicencio; como resultado, se generó un modelo directo termocinemático 3D.

Finalmente, el séptimo artículo, devela el estudio del panorama general sobre la evolución de la informática forense entre los años 2017 al 2020, a partir de algunos elementos como: fundamentos, procedimientos y normativas necesarias en el proceso de recuperación de información y recolección de evidencia digital cuando ocurren cibercrímenes. Los invitamos a explorar las diferentes perspectivas expuestas por los autores que acompañan este volumen, seguramente, podrán encontrar una gran variedad desde las diversas ramas del saber. Así también, a enviar sus artículos para enriquecer las presentes y futuras investigaciones.

Jorge Enrique Espíndola Díaz, PhD.
Editor

IMPACTO DEL VERTIMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LAVADO DE CARBÓN EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO

Impact of dumping of wastewater from carbon washing on the physicochemical properties of the soil

Josselyn Azucena Aquino Montoro¹, Geraldine Paola García Martínez², Laura Valentina García Reyes³
¹Universidad César Vallejo, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Perú. ²⁻³Universidad Santo Tomas, Facultad de Ingeniería Ambiental, Colombia. Email: ¹josselyn.aquino@usantoto.edu.co, ²geraldine.garcia@usantoto.edu.co, ³laura.garcia@usantoto.edu.co

(Recibido junio 13 de 2019 y aceptado junio 15 de 2021)

Resumen

El proceso de carbón es una de las actividades más importantes en el crecimiento económico en el país, sin embargo, en estos últimos años la propia naturaleza ha dado muestras que evidencian los impactos al suelo por la mala gestión y la falta de concientización del hombre, como el deterioro y la pérdida de fertilidad. Por lo tanto, en este estudio se determinó los impactos fisicoquímicos en la capa orgánica del suelo provocados por el vertimiento de aguas residuales del proceso de lavado de carbón en los suelos circunvecinos a las plantas de lavado, o fuentes directas de vertimiento. En este sentido, y por medio de un estudio cuantitativo y cualitativo del agua residual, se determinó la presencia de sustancias por el método de Espectrómetro infrarrojo cercano, conductividad, pH con multiparámetro, turbidez por el método de Nefelómetro y la Demanda Biológica de Oxígeno con la medición de DBO BD 600. De igual manera, para las muestras representativas del suelo se evaluó, pH, porosidad, densidad aparente, humedad de saturación por el método del cilindro de volumen conocido, conductividad y materia orgánica de forma empírica. Los resultados mostraron presencia de metales pesados, pH de 3,45 a 8,64 dentro de los rangos de acidez, valores altos en elementos pesados como el CA2+ en 23500 hasta 80 784 mg/kg de suelo, demostrando que es un suelo altamente contaminado.

Palabras clave: aguas residuales, impacto, parámetro fisicoquímico, producción de carbón, suelo.

Abstract

The coal process is one of the most important activities in economic growth in the country, however, in recent years nature itself has given evidence that show the impacts on the soil due to mismanagement and lack of human awareness, such as deterioration and loss of fertility. Therefore, this study determined the physicochemical impacts on the organic layer of the soil caused by the dumping of wastewater from the carbon washing process in the surrounding soils to the washing plants, or direct sources of dumping. In this sense, and through a quantitative and qualitative study of wastewater, the presence of substances was determined by the near infrared spectrometer method, conductivity, pH with multiparameter, turbidity by the Nephelometer method and the Biological Oxygen Demand with the measurement of DBO BD 600. In the same way, for representative soil samples, pH, porosity, apparent density, saturation humidity was evaluated by the cylinder method of known volume, conductivity and organic matter empirically. The results showed the presence of heavy metals, pH from 3.45 to 8.64 within the acidity ranges, high values in heavy elements such as CA2 + in 23500 to 80 784 mg / kg of soil, demonstrating that it is a highly contaminated soil.

Key words: wastewater, impact, physicochemical parameter, coal production, soil.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se producen más de 4.030 millones de toneladas de carbón, siendo este un incremento del 38% en comparación con las últimas dos décadas, el crecimiento de esta producción se ha visto reflejada en Asia, mientras que en otros lugares se ha observado un descenso significativo como es el caso de los países europeos. Los cinco principales productores son China, EE. UU., India, Australia y Sudáfrica. Actualmente, el carbón es el segundo recurso natural no renovable, después del petróleo, utilizado para procesos tecnológicos e industriales, que de manera directa o indirecta hace parte del sustento económico y capacidad de desarrollo de las naciones a nivel mundial [1]

La exportación de carbón en Colombia es una de las actividades antropogénicas más extendidas y productivas que surgió a través de la crisis energética en 1973, despertando en la economía el interés de sustitución energética del petróleo [2]. Cabe destacar que entre el 2003 al 2007, la producción de carbón presentó un incremento en su producción de 39.72%, con 70 millones de toneladas.

El desarrollo de ciertos procesos en la minería del carbón como la exploración, explotación, el beneficio, la transformación y el transporte constituye una serie de impactos medioambientales tales como el deterioro y la contaminación de suelo, aire y agua; efectos de la mala gestión, carencia en la regulación legislativa y ejecución de las actividades correspondientes a este proceso [3].

El suelo es un recurso importante por su función como soporte de todas las actividades cotidianas de la humanidad, su fertilidad juega un papel muy importante en el desarrollo de actividades agrícolas y alimentarias; sin embargo, la problemática del vertimiento irregular de aguas residuales provenientes del proceso lavado de carbón, concentra altos grados de sólidos suspendidos que contaminan y afectan las condiciones físicas y originarias como la fertilidad y estructura de los suelos [4].

Algunas investigaciones demuestran que el vertimiento de aguas residuales al suelo puede generar cambios en sus características originarias como el grado de compactación, acidez, salinidad y mineralización [5], debido a la acumulación de altas concentraciones de carbono orgánico, metales pesados en el horizonte superficial, poniendo en riesgo la salud de la población aledaña a los vertimientos [6].

Aunque en los últimos años, en Colombia la legislación ambiental y la normatividad ha consagrado a las empresas explotadoras de carbón, normando la implementación de circuitos semicerrados que recirculan un cierto porcentaje de sus efluentes generados en sus instalaciones interiores; no obstante, se ha podido comprobar que en muchos casos se siguen produciendo aguas residuales contaminadas que podrían ser vertidos en los cauces públicos o en el suelo circundante, a los lugares en los que se realiza el proceso de lavado de carbón [7].

Por medio de esta investigación, se plantea identificar los impactos fisicoquímicos en la capa orgánica del suelo por el vertimiento de aguas residuales provenientes del proceso de lavado de carbón, a través de una revisión bibliográfica para determinar los parámetros fisicoquímicos como el pH, conductividad, turbiedad y DBO del agua residual; así mismo, el análisis de sustancias en el suelo afectado y, posteriormente, una comparación con los estándares de calidad de suelo y límites máximos permisibles de vertimiento, para la formulación de alternativas de mitigación ante esta problemática.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo del agua residual

La toma de muestras de agua residual para el análisis fisicoquímico se puede realizar a partir de un método manual directo, donde se seleccionan dos muestras con una capacidad de 2 litros [8]. Para este procedimiento se usan envases de plástico para la recolección, almacenamiento y transporte de la muestra; en seguida, se realiza el análisis fisicoquímico de la composición del agua residual en los laboratorios.

El pH, es un parámetro químico del agua, donde se expresa la concentración de ion hidrógeno, el cual posee dos rangos según los valores que se obtenga, como la condición ácida o alcalina de una solución [6].

Para su medición se utilizará un ph metro HANNA, donde, inicialmente, se verterá en el electrodo el agua destilada para quitar impurezas o restos de otras muestras en el envase, después de prender el equipo se espera cierto tiempo para que el instrumento se estabilice y calibre. Al tener dos vasos precipitados de 250 ml con la muestra de agua residual, se inserta el phmetro y se espera de 3 a 4 minutos para su respectiva lectura, aparte del valor de pH, este también proporciona el valor de la temperatura en °C [8].

La turbiedad en el agua es un parámetro físico con altas concentraciones de materia suspendida y coloidal, el cual se puede medir en Unidades Nefelométricas de turbidez (NTU) (Carpio Galván, 2007). Este parámetro se determina con un nefelómetro o Turbidímetro, empezando con la limpieza del contenedor del equipo con agua destilada para asegurar un margen de error mínimo, posteriormente, se vierte un poco de la muestra, con el fin de impregnar el contenedor con la misma. Luego, se vierte la muestra hasta la línea límite del envase, en seguida, se tapa y se introduce en el turbidímetro. Se debe fijar en el triángulo del equipo y que estos coincidan para obtener un buen resultado. Finalmente, se espera de 3 a 4 minutos y se obtiene el valor de turbidez en NTU [8].

Análisis fisicoquímico del agua residual

Conductividad. Es una medida de la propiedad que posee las soluciones acuosas con el fin de transmitir la corriente eléctrica. Para su respectiva medición en laboratorio, su unidad en el sistema internacional de unidades es equivalente a micro siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) [9].

Demanda biológica de oxígeno (DBO). Se diagnostica a través de un instrumento llamado "Sistema de medición de DBO BD 600" el cual determina la cantidad de DBO presente en las muestras debido a la diferencia de presión

en el sistema. Donde se encuentra una relación entre el DBO a esperar y el volumen a emplear, encontrándose un rango de 0 a 4000 mg/l, en cuanto a los intervalos de medida de DBO, con relación al volumen de la muestra en ml y la dosificación de inhibidor de nitrificación ATU [8].

En el frasco de muestra se encuentra el espacio del volumen, y por encima un espacio para gases con cantidad de aire definida, donde la presencia de bacterias genera el consumo del oxígeno disuelto en la muestra, que al mismo tiempo, produce el dióxido de carbono, el cual se combina con el hidróxido de potasio, creando una disminución de presión en el sistema, como resultado, se obtiene el valor para el DBO [8].

Para su respectivo análisis, se llevará a cabo una comparación de los parámetros hallados del agua residual proveniente de la planta de lavado San Francisco, con la Resolución 631 del 2015, Art.10. "Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería".

Muestreo de suelo

Se toman muestras de suelo en la zona circundante a la planta de lavado de carbón, que recibe las aguas residuales del proceso. Para llevar a cabo el análisis de condiciones edáficas, se debe realizar una cajuela en la zona de estudio para la recolección de las muestras de suelo, además, identificar *in situ* sobre el color del suelo utilizando la tabla Munsell.

Posteriormente, se procede a realizar una recolección de muestra de suelo que se depositarán en bolsas ziploc limpias para que no se generen cambios en las condiciones fisicoquímicas del suelo recolectado, las cuales serán llevadas para el debido estudio en laboratorio.

Análisis fisicoquímico del suelo

La presencia de sustancias. Se determina por el método de espectrofotómetro infrarrojo cercano NIRS con una ventana de cuarzo de 25 cm² y un rango de 1100 a 2500

nm para 2 mm teniendo en cuenta la primera medida del tamaño de la partícula. La cantidad requerida para este método de muestra de suelo es de 200 g, colocando la muestra sobre una placa de vidrio y se mide con la sonda. La sonda fue limpiada después de cada medición. El intervalo del rango útil fue de 1100 nm a 2000 nm, y el rango espectral se promedió cada 2 nm, generando 450 puntos de datos para cada observación tomando un tiempo aproximado de 3 minutos en el estudio.

Los modelos de regresión se construyen utilizando la concentración de SOM obtenida de la muestra con el método de Walkley-Black, como la variable independiente y las lecturas de los espectros NIRS como la variable dependiente [10].

El pH, se puede medir por el método Potenciométrico a partir de la toma de una muestra, que previamente se secará a unos 40°C durante varias horas, se tamizará con un tamiz de 2mm, después se toman 20g de tierra previamente tamizada y se agrega en un vaso de precipitados con 50 ml de agua destilada, agitando durante tres minutos, aproximadamente. Se deja reposar durante 15 minutos y, finalmente, se toma el valor del pH usando el potenciómetro [11].

La porosidad y la densidad aparente en el suelo se puede medir de forma directa realizando una suposición, que es igual a la humedad de saturación.

Para su determinación puede presentar variaciones según el grado de desarrollo y el tipo de estructura que posee (Gómez Giraldo, 2013), en este caso, se determina mediante el método del cilindro de volumen conocido. En el laboratorio se extrae el suelo contenido dentro del cilindro en un recipiente con un peso conocido y se realiza la medición de peso neto de suelo; a continuación, se introduce el recipiente con el suelo a un horno hasta que este se encuentre totalmente seco y así poderlo retirar del horno y realizar la toma del peso en seco (Castro Franco).

Se reconoce el volumen del cilindro mediante la siguiente fórmula (1) y (2):

$$\text{Volumen cilindro (cm}^3\text{)} = 3.1416 * h * R^2 \quad (1)$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso seco del suelo (gr)}}{\text{Volumen del cilindro (cm}^3\text{)}} \quad (2)$$

La conductividad se mide con un conductímetro, donde, inicialmente, se pesa aproximadamente de 100 g a 200 g de suelo, se agrega agua y se mezcla con una espátula hasta obtener la pasta saturada, la cual se deja en reposo por 4 horas. Después, se transfiriere la muestra a un embudo Buchner con papel filtro y se aplica al vacío. La extracción al vacío termina cuando el aire comienza a pasar a través del filtro. Finalmente, la conductividad del extracto se puede observar en el conductímetro usando el KCl para calibrar el metro [12].

La presencia de materia orgánica se mide mediante el proceso de oxidación incompleto del carbono orgánico producido por una mezcla del oxidante de dicromato de potasio y el ácido sulfúrico considerado con un calor de dilución entre los 110 ° C a los 130 ° C. Así también, se determina la temperatura antes de este proceso, la cantidad de materia orgánica presente y se establece el tamaño de los recipientes de medición. Para el consumo del agente oxidante al final de este procedimiento, se determina mediante espectrofotometría Ultravioleta visible [1].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis fisicoquímico del agua residual

Para las Guía De Orientación Para El Minero Sobre El Correcto Manejo De Vertimientos Para La Minería De Metales Preciosos Y De Carbón expone este proceso de lavado con el cual se desea el porcentaje de cenizas e impurezas para minimizar los impactos ambientales negativos asociados con la combustión del carbón. El proceso puede ser en húmedo, según tamaño y forma, o en seco, según las diferencias en densidad y fricciones [13].

“Assessing the fate of antibiotic contaminants in metal contaminated soils four years after cessation of long-term wastewater” es un estudio en el cual sus autores investigan acerca de la contaminación de los suelos agrícolas de riego con antibióticos y metales pesados a través de la aplicación de aguas residuales urbanas no tratadas de la región de París, aproximadamente a 6 km del PTAR Sena Aval [14].

Por otro lado, y a través de otras investigaciones y estudios a nivel mundial, se ha podido determinar que existe contaminación por metales pesados, algunos como el cromo, cadmio, plomo y concentraciones mínimas de mercurio, resultado del vertimiento de aguas residuales del proceso de explotación minera [15].

De la misma manera, para el estudio de optimización del sistema de bombeo y manejo de las aguas residuales producto de la explotación minera, se genera un resultado en cuanto los parámetros evaluados como el pH, donde específica que se genera una relación de tendencia alcalina o ácida del agua, mas no, una medida de la cantidad de ácido o alcalino presente en la muestra, lo que revela que, entre mayor sea la acidez de la muestra, hay una mayor acción de corrosión [16].

En cuanto a la conductividad eléctrica, determina que depende del contenido de sales que se encuentren presentes en la muestra. De otro lado, los metales pesados debido a su efecto nocivo en la salud humana, deben ser monitoreados y que no superen los valores límite máximos permisibles; de esta manera, se reconoce los metales y metaloides, los cuales no se reportan como “no detectables” entre los que se encuentra: el Cadmio, Arsénico, Plomo, Níquel y plata [16].

Análisis fisicoquímico del suelo

Para el análisis del pH, según estudios previos en la zona minera de Rasgata Bajo (Tausa) se evaluó el pH en 4 muestras de suelo, donde se obtuvo un valor de 3,45 a 8,64 dentro de los rangos de acidez, el cual predice que este valor es causado por la presencia de grandes cantidades de metales pesados que provienen de los

vertimientos de lixiviados de dicha industria, así mismo, en la medición de conductividad eléctrica del suelo se obtuvo como datos menores de 1dS/cm, perteneciente al grupo de no salinos según el EPA de suelo en Colombia y normal en el IGAC; por otro lado, se determinó el porcentaje de materia orgánica del suelo y los resultados obtenidos según el EPA, los cuales ilustran que solo la muestra 1 y 2 se clasifican en orgánicos con valores de 6.4 a 10.4 y, seguidamente, la muestra 3 y 4 con 1.9 a 0.9, los cuales presentan acumulación de minerales en la superficie del suelo [17].

Para el análisis de la densidad en el suelo, tomando como referencia un estudio de análisis físicos en el suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia, se obtuvo valores que oscilaban entre 0,88 g/cm³ y 1,34 g/cm³, los cuales aumentaban con el tiempo del uso de suelo, como el deterioro del suelo por las malas prácticas en la zona andina colombiana de sus suelos agrícolas, pero a pesar de ello la evaluación de la porosidad total en esos suelos con una disminución del 10%, que afecta el crecimiento de las raíces y la intercepción del agua [18].

Para la determinación de sustancias en el suelo, en un estudio realizado en San José de las Lajas por el vertimiento de sus aguas residuales en el cuerpo edáfico circundante, por medio del método de espectrofotometría, se obtuvo valores altos en elementos pesados como el CA²⁺ en 23500 hasta 80 784 mg/kg de suelo entre una distancia de 10 m a 50 m de la Empresa, MG²⁺ en 650 hasta 11 176 mg/kg de suelo con las mismas distancias, MN²⁺ en 50 hasta 1460 mg/kg de suelo, PB²⁺ en 219 hasta 62 800 mg/kg, entre otros. Donde se infiere que, a medida que incrementa la distancia, mayor se concentran las sustancias, debido al proceso de lavado y continuos vertimientos de aguas residuales al suelo [19].

Además, cabe mencionar que los cambios e impactos a la capa superficial del suelo, son provocados por la falta de legislación y el mal manejo de estas sustancias, trayendo como segunda consecuencia, daños irreversibles en la actividad agrícola, como también, problemas sociales y

salud de los habitantes circundantes a la minera [20].

No obstante, estos cambios pueden ser remediados con la formulación de posibles alternativas de mitigación sobre los impactos fisicoquímicos al suelo por el vertimientos de las aguas residuales del lavado de carbón, tales como el diseño de una cápsula que cumpla el objetivo de minimizar y dar una disposición final a los lixiviados y aguas residuales provenientes de la minería, además, de poseer resistencia, soportar temperaturas entre 1100 a 1300 °C y mantenerse constante sin sufrir ningún tipo de reacción al óxido [21]. Como otra alternativa para recuperación de suelos degradado, son las plantaciones forestales de Azadirachita como modelo de restauración activa, esto fue aplicado en Santa fe de Antioquia, cuenca del río Cauca, el cual generó beneficios positivos como el mejoramiento significativo del ciclo biogeoquímico e incremento de la materia orgánica y nutrientes como P y K [22].

Así mismo, [23] plantea otro método de restauración de suelo a través de la fertilización orgánica por compost producido a partir de dos tipos de hojarasca, esto fue aplicado en el Pasto de Piata, municipio El Dorado, donde se mostraron resultados crecientes en su fertilidad.

4. CONCLUSIONES

Los parámetros analizados en el agua residual proveniente de la planta de lavado de carbón, como el pH, arrojan un valor menor a 5, resultado que indica que el agua al salir del proceso de lavado adhiere algunas características del carbón y otras sustancias que se agregan en su lavado. Como consecuencia, esto afecta su condición natural, además, se convierte en un agente contaminante de otras áreas como el suelo, por su vertimiento al exterior.

El análisis de los parámetros fisicoquímicos de la capa orgánica del suelo circundante a la planta de lavado de carbón, tienden a tomar un valor de pH 3,5, es decir, altamente ácido, porque el cuerpo de agua al tener contacto con el suelo, le transmite ciertas sustancias cambiando su condición natural, como la pérdida de

materia orgánica y la disminución del 10 % de la porosidad del suelo.

Las posibles alternativas de mitigación a emplear, tales como la aplicación de compost orgánico al suelo degradado o con falta de nutrientes y materia orgánica, es de gran ayuda, ya que lo enriquece de manera progresiva y no se realiza un gasto innecesario, este puede ser preparado manualmente con excretas de ciertos animales. Así mismo, para las aguas residuales se recomienda realizar un tratamiento previo para eliminar algunas sustancias tóxicas o metálicas, y después ser vertidas al exterior.

En conclusión, se puede afirmar que la producción del carbón con la contaminación de la capa orgánica del suelo, tiene una relación directa, ya que, si se tiene mayor demanda del producto, se utilizará mayores cantidades de agua; en consecuencia, esas cantidades de aguas residuales serán emitidas a los suelos circundantes de la zona del proyecto, provocando impactos como erosión y pérdida de su condición natural. No obstante, si son aplicadas correctamente algunas de las medidas de mitigación, entonces, la afectación sería mínima a comparación del anterior.

REFERENCIAS

- [1] I. M. Alemán Vásquez y F. P. Guido Paniagua, «Comparación De Dos Técnicas Para La Determinación De Carbono Orgánico Del Suelo, En El Lafqa Departamento De Química,» Repositorio Institucional UNAN-Managua, 2015.
- [2] B. d. I. r. d. Colombia, «La economía del carbón,» 1997.
- [3] u. m. e. UPME, «Guía minero ambiental,» 2005.
- [4] L. Faba Peon, «Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la depuración de efluentes procedentes de un lavadero de carbón,» p. 112, 2017.
- [5] M. Guerrero Useda y V. Pineda Acevedo, «Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgatá bajo (Tausa). Modelo conceptual,» *Ciencia e ingeniería neogranadina*, vol. II, nº 1, pp. 57-74.,

- 2016.
- [6] Fátima tamtam, Folkertvan Oort, BarbaraLe Bot, TucDinh, S. Mompelat, M. Chevreuil, I. Lamy y M. Thiryd, «Assessing the fate of antibiotic contaminants in metal contaminated soils four years after cessation of long-term waste water,» *Science of the total environment*, vol. 409, nº 3, pp. 540-547, 2010.
- [7] A. Gustavo, «Ph en agua por electrometría,» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, 2007.
- [8] IDEAM, «Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales,» Bogotá, 2007.
- [9] Lovibond, «Sistema de medición DBO BD 600,» 2019.
- [10] D. Sanabria Suárez, «Conductividad Eléctrica Por El Método Electrométrico en agua,» Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, 2006.
- [11] A. Jarquín Sánchez, S. Salgado García, D. J. Palma López y W. Camacho Chiu, «Analysis of soil organic matter in tropical soils with near-infrared spectroscopy (NIRS) and chemometrics,» *Ciencia e investigación agraria.*, vol. 39, nº 2, pp. 387-394, 2012.
- [12] J. Espinosa y E. Molina, «Acidez y enclado de suelos,» *International Plant Nutrition Institute*, pp. 3-6, 1999.
- [13] Energético-UPME, «Guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón,» 2015.
- [14] S. J. McKean, «Manual De Análisis De Suelos Y Tejido Vegetal,» *Centro Internacional de Agricultura Tropical*- CIAT, pp. 11-15, 1993.
- [15] B. d. I. República, «Minería en Colombia: Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos,» Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá, 2003.
- [16] A. Muñoz Ospino, «Optimización del sistema de bombeo y manejo de las aguas residuales producto de la explotación minera en la mina de carbón San Fernando, operada por carbones San Fernando SAS, vereda Paso Nivel, Amaga-Antioquia,» *Facultad de ciencias-Escuela de ingenieros de minas*, 2016.
- [17] M. Guerrero Useda y V. Pineda Acevedo, «Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgatá bajo (Tausa). Modelo conceptual,» *Ciencia e ingeniería neogranadina*, vol. 26, nº 1, pp. 57-74, 2016.
- [18] B. Gutierrez Rapalino y Y. Domínguez Haydar, «Contribución de Pheidole fallax y Ectatomma ruidum (Hymenoptera: Formicidae) en la dispersión y germinación de semillas en áreas rehabilitadas de la mina de carbón del Cerrejón, Colombia,» *Revista de Biología Tropical*, vol. 65, nº 2, 2017.
- [19] S. Ambar Guzmán, «Degradación de un suelo por efecto de residuales de la empresa cerámica del municipio San José de las Lajas,» *Ciencias técnicas agropecuarias*, vol. 17, nº 3, pp. 45-51, 2018.
- [20] Argota Correa, «Desarrollo socioeconómico regional: impactos de la minería artesanal en el bajo Cauca Antioqueño,» *Internacional de cooperación y desarrollo*, vol. 4, nº 1, pp. 46-61, 2017.
- [21] M. Gregory y A. Yaxley, «Methane-bearing fluids in the upper mantle: an experimental approach,» *Contributions to mineralogy and petrology*, pp. 1-14, 2018.
- [22] C. Florez Florez, J. León Pelaez, N. Osorio Vega y M. Restrepo Llano, «Dinámica de nutrientes en plantaciones forestales de azadirachta indica (meliaceae) establecidas para restauración de tierras degradadas en Colombia,» *Biológico tropical*, vol. 61, nº 2, pp. 515-529, 2013.
- [23] R. J. Previdelli Marco, «Características productivas, morfológicas y estructurales,» *Ciencia rural*, vol. 43, nº 7, pp. 1238-1244, 2013.

COMPORTAMIENTO DE LA QUÍMICA INORGÁNICA DE LOS CARBONES BITUMINOSOS EN EL SINCLINAL CHECUA – LENGUAZAQUE

Behavior of the inorganic chemistry of bituminous coals in the Checua - Lenguazaque syncline

David Alejandro Herrera Carvajal¹, John Elkin Rincón Bayona², Sandra Manosalva Sánchez³

¹⁻²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Geológica, Colombia.

³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Geológica, Directora del Grupo de Investigación de Ingeniería Geológica INGEOLOG, Colombia. Email: ¹david.herrera01@uptc.edu.co,

²john.rincon01@uptc.edu.co, ³sandra.manosalva@uptc.edu.co

(Recibido abril 15 de 2019 y aceptado mayo 01 de 2020)

Resumen

La Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, es una técnica que permite obtener los porcentajes de la química inorgánica presente en los carbones del flanco occidental del sinclinal Checua- Lenguazaque. Con base en los resultados obtenidos, es posible determinar el comportamiento de la química inorgánica de estos carbones, tanto a profundidad como en su extensión, permitiendo una mejor comprensión acerca de las variaciones químicas y conjuntamente determinar los carbones con mejores características de coquización en base a los factores Fouling y Slagging.

Palabras clave: espectrometría de fluorescencia de rayos X, formación Guaduas, fouling y slagging, química inorgánica del carbón, sinclinal Checua – Lenguazaque.

Abstract

X- Ray Fluorescence Spectrometry is a technique that allows to obtain the percentages of the inorganic chemistry present in the coals of the western flank of the Checua - Lenguazaque syncline. Based on the results obtained, it is possible to determine the behavior of the inorganic chemistry of these coals, both in depth and in their extension, allowing a better understanding of the chemical variations and jointly determine the coals with better coking characteristics based on Fouling and Slagging factors.

Key words: X-Ray fluorescence spectrometry, Guaduas formation, fouling and slagging, coal inorganic chemistry, Checua – Lenguazaque syncline.

1. INTRODUCCIÓN

El sinclinal Checua - Lenguazaque es una cuenca carbonífera que comparte frontera con los departamentos de Boyacá, al oriente y de Cundinamarca, al occidente. La actividad minera en esta zona gira entorno a la formación Guaduas, la cual posee dos miembros carboníferos importantes en los cuales se concentra la gran mayoría de la explotación en este sector.

A pesar que petrográficamente los carbones de este sector resultan ser de gran calidad para la industria del acero, la parte inerte de estos, ha resultado ser un factor poco tenido en cuenta. Esto considerando que, los residuos generados durante la combustión del carbón, a la larga, tiene una gran influencia en el costo de mantenimiento de los hornos usados en el proceso de coquización.

Los compuestos inorgánicos, es decir la materia mineral

presente en los carbones, tiene distintos orígenes, bien sea sin-deposicional, enriquecimiento diagenético y/o tectónico, y al momento de ser expuesto a las altas temperaturas dentro de los hornos, pueden generar estructuras volátiles que generan encostramiento en los hornos.

La química inorgánica también permite la determinación del aporte marino o continental a los carbones, siendo que a la formación guaduas se le ha atribuido un ambiente de depositación transicional anudado a turberas bajas, distribuidas más cerca o más lejos de la paleo línea de costa.

El análisis estadístico realizado sobre los compuestos inorgánicos de los carbones, permite observar la variabilidad química y el comportamiento de los mantos identificados en el área de estudio.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Ubicación de la Zona de Estudio

El Sinclinal Checua – Lenguazaque, (figura 1) se encuentra al NE de Bogotá y al NW de la Sabana en forma de corredor alargado con orientación SW-NE, de ancho variable, limitado por los flancos de una gran estructura de extensión regional, conocida con el nombre de Sinclinal de Checua de la cual se deriva el nombre, comprendida entre las poblaciones de Nemocón al Suroeste y Samacá al Noreste.

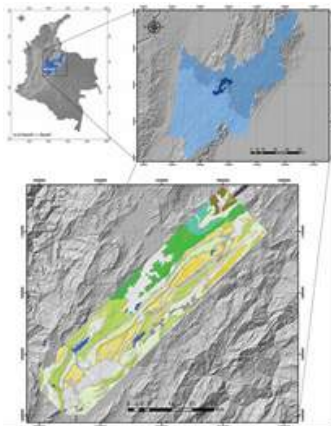


Figura 1. Ubicación general y específica del sinclinal Checua – Lenguazaque.

2.2. Marco Geológico Local

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias, de edades que van del Cretácico al Paleógeno, representadas por las Formaciones: Conejo, Plaeners, Labor-Tierna, Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera y Cuaternario.

La unidad de estudio fue la Formación Guaduas, cuya edad calculada la ubica en el límite Cretácico – Paleógeno, hace aproximadamente 65 M.a [1]. En esta formación se levantaron 3 secciones estratigráficas, en los municipios de Samacá, Guachetá y Sutatausa.

El rumbo promedio de la estructura es N35E y su anchura varía de 3.5 km (Cucunubá) a 12 km (entre las poblaciones de Tausa y Nemocón).

2.3. Marco Estratigráfico Local

Para este estudio se tomó como base los levantamientos de tres secciones estratigráficas descritas por [2], donde se dividió la formación en tres miembros: miembro inferior (K2E1g1), miembro medio (K2E1g2), y miembro Superior (K2E1g3).

2.4. Modelo Sedimentario de los Mantos de Carbón de la Formación Guaduas

Según [1-2-3-4] los carbones de la Formación Guaduas representan facies típicas de ambientes transgresivos parálicos (telmáticos) a limnotelmáticos, detrás de barrera (GI y TPI) con influjo de aguas ricas en calcio que aceleran la descomposición de la materia orgánica y, por lo tanto, la humificación de los precursores de la vitrinita. Lugar en el que se desarrolla un sistema de pantanos de bosques húmedos y secos con intermitencia de moderadas a altas inundaciones y con dominio de plantas arborescentes y herbáceas bajo condiciones ligeramente óxicas a anóxicas.

2.5. Química Inorgánica en Carbones

En [5-6] se enfatiza que el contenido mineral del carbón es la fracción inorgánica no combustible, que se compone de minerales que son ya sea detrítico o autigenético en su origen (figura 2), y que se introducen en carbón en la primera o segunda fase de la carbonización. Una gran

variedad de minerales se puede encontrar en el carbón, comúnmente estos están dominados por los minerales de cuarzo, carbonato, hierro y arcilla con un diverso conjunto de minerales accesorios que pueden ser de la roca o de una fuente local.

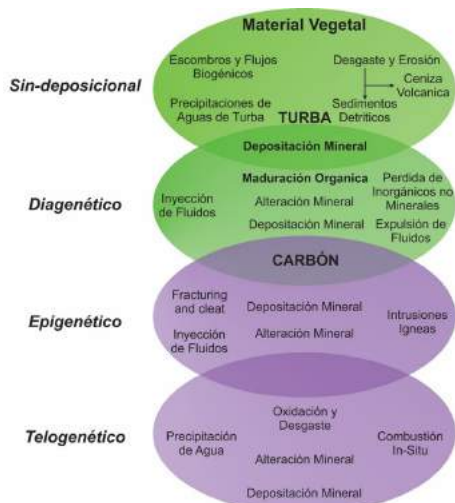


Figura 2. Clasificación del tipo y origen de la materia mineral en los carbones. [7].

2.6. Fouling y Slagging

El factor Fouling hace referencia a la formación de depósitos en superficies de calor de convección, tales como: sobrecalentadores y recalentadores.

Los factores Fouling y Slagging para los carbones se calculan siguiendo la metodología planteada en [8-9].

2.6.1 Factor Slagging. Cuando se habla de Slagging se refiere a la formación de depósitos fundidos o parcialmente fundidos en las paredes del horno o superficies de convección expuestas al calor radiante. Este se forma cuando las partículas de cenizas de fusión o ablandamiento no se enfrían a un estado sólido y cuando alcanzan la superficie de calor.

2.6.2 Factor Fouling. El factor Fouling hace referencia a la formación de depósitos en superficies de calor de convección, tales como sobrecalentadores y recalentadores. Es causado por la vaporización de elementos inorgánicos volátiles en el carbón durante

la combustión. Cuando se absorbe el calor y las temperaturas disminuyen en el área de convección de la caldera, los compuestos formados por estos elementos se condensan en las partículas de cenizas y la superficie de calentamiento, formando un pegamento que inicia la deposición.

2.7. Factores que Influencian la Generación de Fouling y Slagging

Se pueden destacar tres factores principales: El tamaño del reducido del horno, la Fusibilidad de la Ceniza del Carbón en conjunto con la temperatura interna del horno y, por último, los elementos químicos presentes en las cenizas del carbón.

2.7.1 Elementos Presentes en la Ceniza del Carbón. La ceniza lignítica, que se define como que tiene más CaO + MgO que Fe₂O₃, es más fácil de depositar que la de las cenizas bituminosas, que se define como que tiene más Fe₂O₃ que la suma de CaO y MgO.

Los metales alcalinos, sodio y potasio, durante mucho tiempo se han asociado con las tendencias de ensuciamiento (Slagging) de la ceniza de carbón. Las formas volátiles de estos elementos se vaporizan en el horno a la temperatura de combustión y reaccionan con el azufre en los gases de combustión y otros elementos en la ceniza forman compuestos que se depositan en las superficies de convección.

3. METODOLOGÍA

3.1. Consolidación de la Información

El proceso de consolidación, da inicio a la discriminación de las muestras de Carbón, escogiendo 41 muestras que serán objeto de estudio. Dentro de estas muestras seleccionadas para el análisis, se destacan un conjunto de 10 muestras piloto, las cuales ya disponían de análisis de química inorgánica, con la finalidad de servir como control de los datos obtenidos.

3.2. Adecuación y preparación de muestras

El proceso de acondicionamiento se realizó para las 41

muestras seleccionadas y se dividió en tres fases.

La primera fase corresponde a la pulverización del Carbón hasta obtener una granulometría de 75 micras, la cual corresponde el tamaño de malla Taylor n° 200.

La segunda fase corresponde a la incineración de las muestras previamente pulverizadas. Durante la incineración se busca obtener un concentrado de la materia inorgánica.

La tercera fase corresponde a la preparación del concentrado de materia inorgánica. Una vez se obtienen 9 gramos de ceniza del carbón se mezcla con 1 gramo de crema aglomerante LICOWAX, luego se presan en un molde especial y se obtiene una pastilla cilíndrica, adecuada para encajar en los porta muestras del Espectrómetro EPSILON 4.

3.3. Análisis de muestras

Las muestras se disponen en grupos de 10 en el Espectrómetro EPSILON 4, en el cual procede a excitar los núcleos atómicos de los compuestos inorgánicos presentes en la pastilla, añadiéndoles energía, para lo cual se utilizan los rayos x desprendidos de un cátodo de tungsteno.

Al ganar energía, los electrones experimentan el denominado salto cuántico, pasando de un orbital de menor energía (más cerca al núcleo atómico) a uno mayor energía (más lejos del núcleo atómico), e inmediatamente ocurre la pérdida de la misma, con lo cual el electrón vuelve a un orbital de menor energía y por consiguiente se da el desprendimiento de un fotón y calor.

La longitud de onda del fotón es única dependiendo del tipo de elemento, y la lectura de estos por medio del detector nos permite determinar tanto el compuesto inorgánico como su cuantía porcentual dentro de la muestra. (Figura 3).

3.4. Interpretación de la información

Con estos datos se pueden discriminar los elementos

mayores de los elementos menores, teniendo en cuenta la cantidad porcentual presente de estos elementos en las muestras analizadas. Se recalca que aquellos compuestos con cantidades representadas en partes por millón PPM no se tienen en cuenta para este proyecto dada su ínfima concentración en los carbones.

Compound	Conc	Unit	Compound	Conc	Unit
Na2O	0,238	%	Na2O	0,303	%
MgO	0,703	%	MgO	0,104	%
Al2O3	18,813	%	Al2O3	23,004	%
SiO2	63,761	%	SiO2	64,418	%
P2O5	0,378	%	P2O5	0,103	%
SO3	0,592	%	SO3	753,7	ppm
Cl	0,0	ppm	Cl	41,8	ppm
K2O	1,228	%	K2O	0,625	%
CaO	1,187	%	CaO	0,189	%
TiO2	0,913	%	TiO2	1,047	%
Cr2O3	814,6	ppm	Y2O5	309,3	ppm
MnO	67,0	ppm	Cr2O3	470,2	ppm
Fe2O3	1,620	%	MnO	5,8	ppm
NiO	257,5	ppm	Fe2O3	1,878	%
CuO	46,8	ppm	NiO	199,7	ppm
ZnO	172,7	ppm	CuO	58,0	ppm
Ga2O3	30,7	ppm	ZnO	82,5	ppm
GeO2	14,5	ppm	Ga2O3	40,0	ppm
As2O3	1,4	ppm	GeO2	51,9	ppm
MoO3	40,5	ppm	As2O3	15,2	ppm
SnO2	43,9	ppm	Nb2O5	37,0	ppm
Eu2O3	109,6	ppm	MoO3	32,3	ppm
OsO4	0,0	ppm	SnO2	40,2	ppm
IrO2	0,0	ppm	Eu2O3	79,5	ppm
Tl2O3	0,9	ppm	OsO4	0,0	ppm
PbO	44,9	ppm	IrO2	0,0	ppm
ThO2	23,9	ppm	Tl2O3	1,3	ppm
			PbO	41,4	ppm
			ThO2	26,4	ppm

Figura 3. Datos obtenidos posterior al análisis por espectrometría de fluorescencia de rayos x realizado en las muestras de carbón. **(A)** Datos de química inorgánica de elementos mayores y menores obtenidos para la muestra n° 1998. **(B)** Datos de química inorgánica de elementos mayores y menores obtenidos para la muestra n° 2086.

Para un mejor análisis estadístico y con la finalidad de evitar sesgo en la información, se introdujeron al análisis la información química referente a 45 muestras analizadas, previamente, por el Servicio Geológico Colombiano.

El análisis se llevó a cabo usando el programa IBM SPSS STATISTICS, en el cual se realizaron pruebas correlacionando bivariadas y observando su capacidad de correlación por el método de Spearman, explicado en [10-11].

Una vez encontradas las diferentes correlaciones se procede a realizar un gráfico de dispersión de puntos, que muestre la tendencia de estos y su relación bien

sea directa o inversamente proporcional, asociando los datos de química Inorgánica presente en los carbones, correlacionándolos, principalmente, entre ellos y con algunas características físicas de los carbones, sobre todo con los factores Fouling y Slagging.

3.5. Generación de mapas

Los mapas fueron generados ubicando geográficamente los puntos donde las muestras habían sido recolectadas, asignado el valor promedio del compuesto químico para ese punto e interpolando los valores para toda el área de estudio. Estos mapas están distribuidos mostrando las tres secciones principales en las que se dividió el área de estudio, con la finalidad de mostrar la distribución de la química inorgánica en área del sinclinal Checua – Lenguazaque y el control de los ambientes de depositación, teniendo en cuenta que hacia el eje del Sinclinal los elementos depositados tienen un dominio, en su mayoría, continental y, en la parte distal del eje del sinclinal, los elementos depositados están controlados por un régimen mayormente marino.

3.6. Distribución química por mantos de carbón

Con el fin de obtener la distribución a profundidad de la química inorgánica de los mantos de carbón muestreados y analizados, se procedió a graficar los datos tratados en barras laterales, discriminándolos en elementos mayores y menores. (figura 4).

Con las barras laterales se modifican las columnas estratigráficas del sector de estudio. De esta forma, se puede hacer la lectura de la distribución a profundidad de la química inorgánica de los mantos de carbón.

Se debe tener en cuenta que, la sección Samacá no se tuvo en cuenta en este paso del proyecto, dado que los mantos muestreados en esta este sector presentan un alto grado de enriquecimiento mineral, siendo datos anómalos, que dificultan el análisis y, por lo tanto, fueron descartados.

Por los factores antes expuestos, se incluye la sección Cucunuba (correlacionable con la sección Sutatausa) y la

sección Lenguazaque ubicada entre la sección Guachetá y la sección Sutatausa.

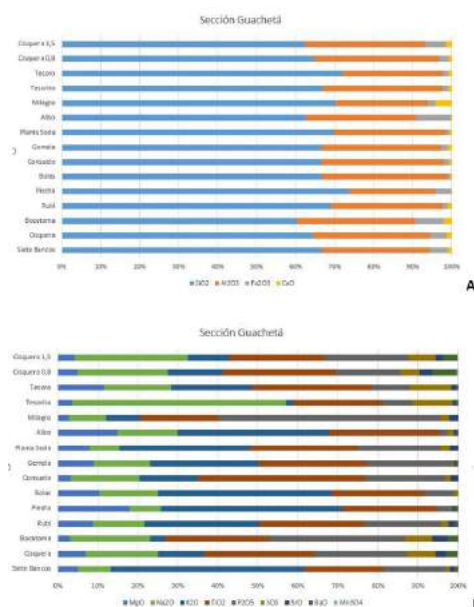


Figura 4. Barras de distribución de química inorgánica en los mantos de carbón de la sección Guachetá. **(A)** Distribución de elementos mayores. **(B)** Distribución de elementos menores.

4. RESULTADOS

4.1. Gráficos de Correlación entre datos

Las gráficas presentadas a continuación, exponen las correlaciones más importantes observadas: Oxido de Calcio vs Anhídrido Fosfórico (figura 5), Factor Fouling vs Óxido Férrico (figura 6), Factor Fouling vs Óxido Sódico (figura 7), Factor Fouling vs Óxido de Sílice (figura 8) y Factor Slagging vs Óxido Férrico (figura 9).

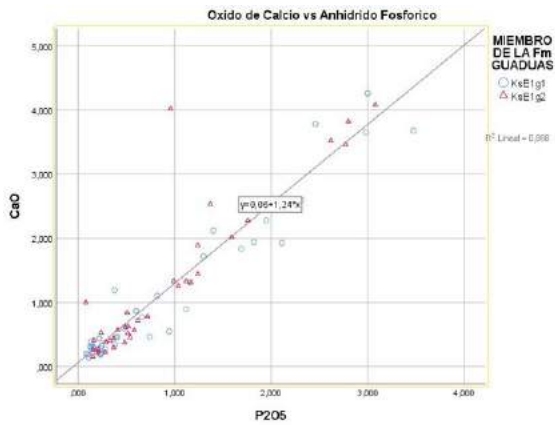


Figura 5. Gráfica de correlación directa entre el óxido de Calcio y el Anhídrido Fosfórico discriminando por miembro estratigráfico.



Figura 8. Gráfica de correlación inversa entre el Factor Fouling y el Óxido de Silice discriminando por miembro estratigráfico.

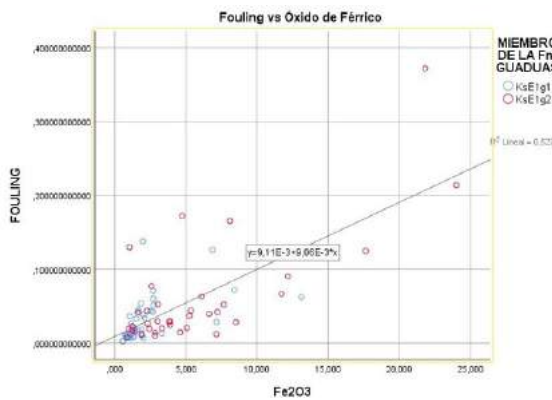


Figura 6. Gráfica de correlación directa entre el Factor Fouling y el Óxido Férrico discriminando por miembro estratigráfico.

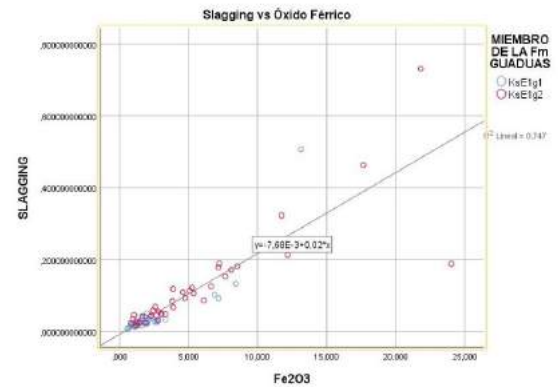


Figura 9. Gráfica de correlación directa entre el Factor Slagging y el Óxido Férrico discriminando por miembro estratigráfico.

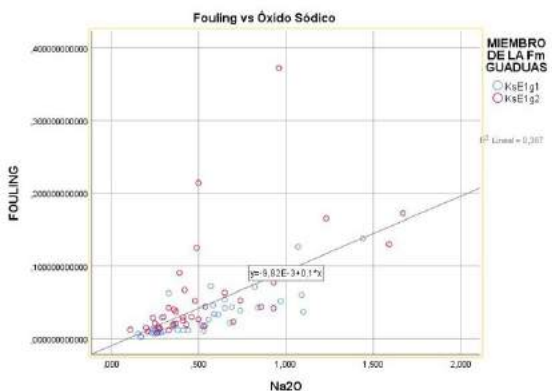


Figura 7. Gráfica de correlación directa entre el Factor Fouling y el Óxido Sódico discriminando por miembro estratigráfico.

4.2. Resultados de la Sección Guachetá

Los datos muestran que los elementos mayores (figura 10) son Silicio (60% a 74 %), Aluminio (30-35 %), Hierro (2 -7 %) y Calcio (\leq 2 %- 3%). Elementos menores (figura 11) o iguales a 1%, están en orden de abundancia, Potasio, Titanio, Sodio, Fósforo, Magnesio, Bario y Manganeso.

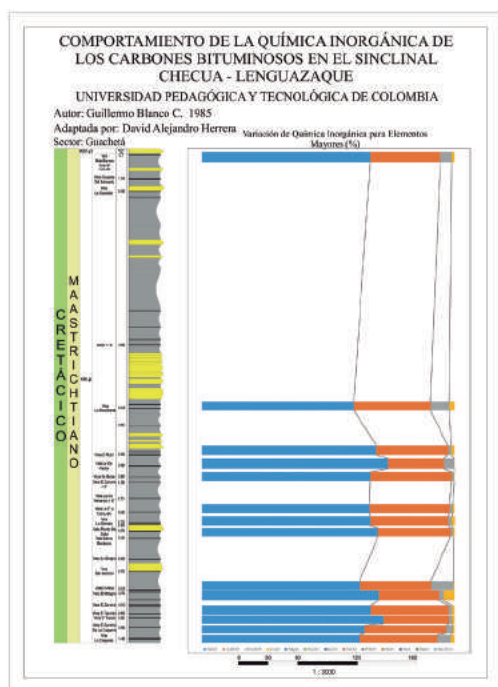


Figura 10. Columna Estratigráfica de la Sección Guachetá con distribución de elementos mayores.

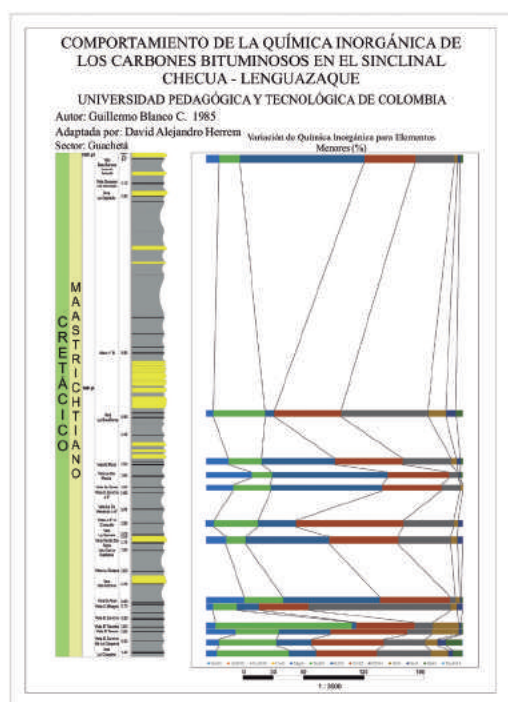


Figura 11. Columna Estratigráfica de la Sección Guachetá con distribución de elementos menores.

4.3. Resultados de la Sección Lenguaque

Los datos muestran que los elementos mayores son Silicio (58 a 62 %), Aluminio (25-30 %), Hierro (2-9 %) y Calcio (≤ 2 %). Elementos menores o iguales a 1%, están en orden de abundancia, Potasio, Titanio, Fósforo, Sodio y Magnesio.

Al observar la distribución de elementos mayores en esta sección, no se encontró la existencia de una secuencia o comportamiento que siga la química, no obstante, al analizar el comportamiento de los elementos menores, es posible observar un aumento en el Magnesio, Sodio, Titanio, SO₃, Estroncio, Bario y un descenso en el Potasio y el Fósforo.

4.4. Resultados de la Sección Cucunuba - Sutatausa

Los datos muestran que los elementos mayores son Silicio (61% a 73 %), Aluminio (25-35 %), Hierro (2-10 %) y Calcio (≤ 2 %- 3%). Elementos menores o iguales a 1%, están en orden de abundancia, Potasio, Titanio, Fósforo, Magnesio, Sodio, Bario y Manganeseo.

En consecuencia, al observar la distribución de elementos tanto mayores como menores en esta sección, no se encontró la existencia de una secuencia o comportamiento de aumento o descenso que sigan los compuestos químicos. Estos aumentos y descensos irregulares de la concentración de estos compuestos permiten discernir que su fluctuación depende de factores diagenéticos y no sin-deposicionales.

4.5. Mapas de Variación Química

4.5.1 Óxido Férrico. Hacia el sector de Guachetá y Sutatausa se observa que las concentraciones más grandes de este compuesto están hacia el eje del sinclinal lo cual nos indica un aporte principalmente continental. Sin embargo, hacia el sector de Samacá esta distribución se pierde y se logran apreciar valores realmente altos, que nos indica una gran concentración de este compuesto en toda esta sección, posiblemente de origen epigenético o telogenético. (Figura 12).

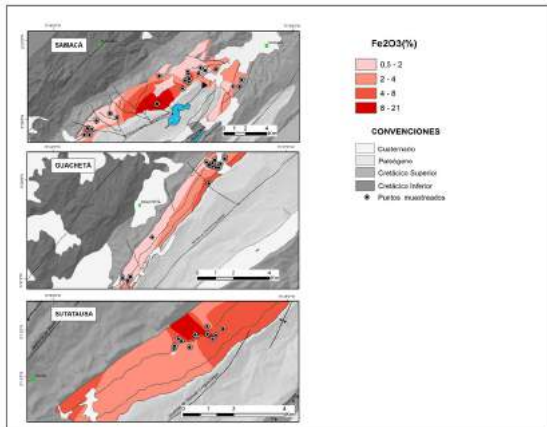


Figura 12. Mapa de distribución del Óxido Férrico para las tres secciones estratigráficas.

4.5.2. *Óxido de Aluminio.* Tanto en el sector de Samacá como se Sutatausa se puede observar que las mayores concentraciones están hacia el lado opuesto del eje del sinclinal, lo cual indica un aporte esencialmente marino. Sin embargo, en el sector de Guachetá esta distribución cambia radicalmente mostrando las mayores concentraciones hacia el eje del sinclinal, lo cual podría indicar un aporte importante de minerales arcillosos provenientes del continente. (Figura 13).

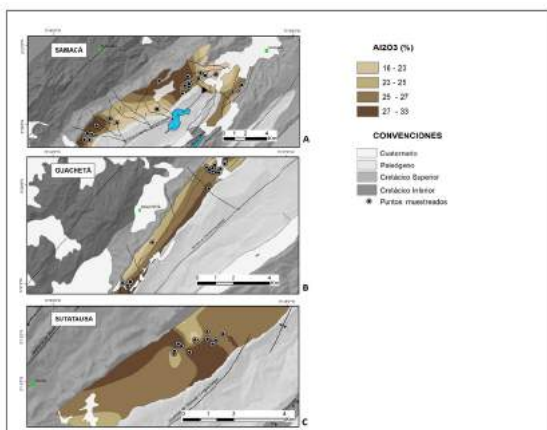


Figura 13. Mapa de distribución del Óxido de Aluminio para las tres secciones estratigráficas.

4.5.3. *Óxido de Silicio.* Hacia el sector de Samacá se observa que las mayores concentraciones están hacia

el eje del sinclinal, lo cual indica que en este sector la depositación de este compuesto fue dominada por la parte continental. En el Sector de Guachetá las mayores concentraciones están en el lado opuesto al sinclinal, lo cual ilustra que el aporte a la cuenca en este sector fue dominado por un régimen marino. (Figura 14).

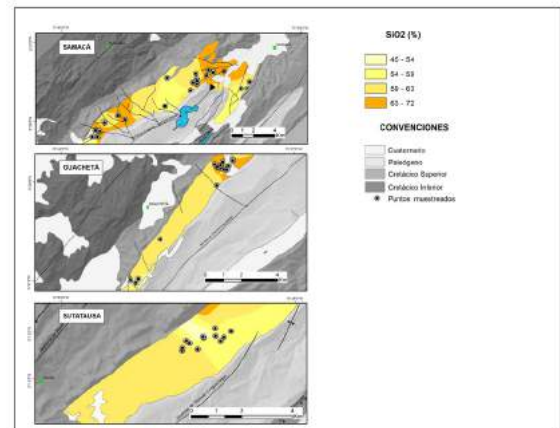


Figura 14. Mapa de distribución del Óxido de Sílice para las tres secciones estratigráficas.

4.5.4. *Óxido de Calcio.* Los mayores valores están en el lado opuesto del eje del sinclinal, indicando que su depositación a lo largo de toda la cuenca fue principalmente dominada por un régimen mareal, tal cual se espera que sea. (Figura 15).

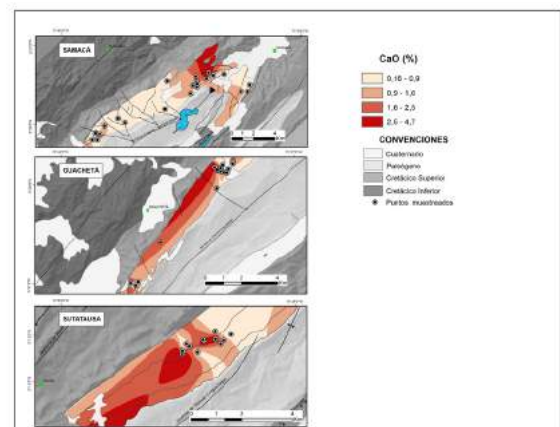


Figura 15. Mapa de distribución del Monóxido de Calcio para las tres secciones estratigráficas.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

1. Los datos arrojados por el espectrómetro resultan ser concordantes con lo obtenido en la búsqueda bibliográfica, cuando se realizó la comparación mediante mantos y secciones, este proceso permitió encontrar datos anómalos (muy elevados o disminuidos), los cuales se aislaron para su posterior búsqueda en los mapas y determinar el origen de esta anomalía.

2. Las correlaciones permiten determinar cómo ciertos elementos tienen una influencia directa sobre el poder calorífico del carbón, es decir, elementos como el Na₂O incrementan la capacidad de combustión del carbón, caso contrario el K₂O y el MgO, los cuales entre mayor presencia tengan dentro del carbón menor, será la capacidad de combustión de este.

3. Elementos como el Na₂O y el Fe₂O₃ al ser sometidos a altas temperaturas generan volátiles semifundidos, que al hacer contacto con una superficie un poco más fría se solidifican, creando un encostramiento y ensuciamiento en las superficies expuestas a este tipo de semifundidos generados. Estos factores denominados Fouling y Slagging, resultan ser muy importantes en la industria siderúrgica, dado que de esto depende el tiempo de mantenimiento de los hornos de producción de coque, lo cual se puede traducir en pérdidas para la empresa.

4. Algunos compuestos químicos presentan una fuerte correlación entre ellos, debido a que el ambiente de depositación de estos suele ser muy similar. Este es el caso del CaO junto con el P₂O₅, para estos dos compuestos químicos se les ha atribuido un origen similar en el ámbito Geoquímico, hecho que sustenta la alta presencia de uno de ellos e indica directamente una fuerte presencia del otro.

5. En la sección estratigráfica Samacá – Ráquira, es posible ver anomalías químicas interesantes en el mapa que no parece seguir una distribución regular, esto puede deberse al hecho que esta sección en particular dentro del sinclinal, sufrió un fuerte fracturamiento y diaclasamiento

debido al tectonismo intenso presente en esta zona.

6. Este intenso tectonismo se puede evidenciar también con el alto grado de maduración que presentan los carbones en esta sección estratigráfica. El diaclasamiento de los mantos de carbón facilita la entrada de agua escorrentía oxidando los mantos y el fallamiento, debido al calor y fricción generado la recristalización de familias minerales dentro de las cuales están implícitos los compuestos químicos acá analizados.

7. Las columnas estratigráficas nos permiten observar que no existe correlación alguna entre la química inorgánica y la profundidad a la que se encuentra el manto, asunto que permite deducir que estos compuestos químicos están principalmente regidos por las condiciones de depositación y la posterior diagénesis sufrida.

8. En la distribución de elementos mayores para la sección Guachetá (figura 11) se observa una tendencia entre el comportamiento del Sílice y del Aluminio, a medida que uno aumentó, el otro también; al igual que con el descenso, esta tendencia se pierde para con los demás elementos mayores, los cuales no muestran correlación respecto a estos dos primeros. Con los elementos menores (figura 12) se aprecia un aumento significativo del sodio en ciertos mantos a medida que se profundiza, lo que puede indicar un control de este elemento por las condiciones de depositación o cambios diagenéticos relacionados con la profundidad, ya sea la recristalización de minerales por acción del gradiente Geotermal o por acción de aguas subterráneas. A profundidad se aprecia también el aumento del SO₃, Estroncio y Bario.

9. Al analizar los mapas generados es posible encontrar en algunas secciones estratigráficas, una distribución gradada de la concentración de un elemento químico en específico, este hallazgo permite identificar si el aporte de este elemento es principalmente continental o marino, teniendo siempre en cuenta la Paleo Línea costera.

6. CONCLUSIONES

El método de fluorescencia de Rayos-X resulta muy efectivo a la hora de realizar análisis químico a los carbones, dado que la respuesta de cada compuesto al ser irradiado ya ha sido previamente estudiada y solo resta comparar los datos obtenidos.

La correlación directa que existe entre compuestos como Fe₂O₃, SiO₂ y Na₂O con el factor Fouling dan un excelente componente a la hora de determinar aquellos mantos de carbón que, al momento de ser llevado al horno, podrían generar un encostramiento en este, lo cual causa pérdidas importantes a las empresas por el costo del mantenimiento.

El factor Slagging resulta tener una correlación directa con el Fe₂O₃, por esta razón, y a causa del hecho que para calcular este factor se usa el Óxido Férrico, dado su alto contenido en la muestra, este suele tener una gran influencia en el cálculo del mismo.

El poder calorífico es uno de los factores que mayor correlación presenta con los compuestos químicos, tanto de forma directa como inversa. El MgO, K₂O y las cenizas, reducen el poder calorífico de un carbón esto debido a que al ser incinerados estos compuestos resultan ser inertes. Por el contrario, el Na₂O resulta ser un compuesto químico que posee la propiedad inherente de incrementar sustancialmente la combustión de otras sustancias, en este caso del carbón.

En la búsqueda de encontrar una explicación más certera para los valores anómalos hallados, se realizó un rastreo de dichos puntos dentro de los mapas elaborados. Durante dicho reconocimiento se encontró que varios de estos se ubicaban cerca o sobre fallas locales que afectan el sinclinal. Este enriquecimiento en ciertos minerales puede deberse directamente a la interacción de la falla con el manto en ese punto o a la infiltración de agua escorrentía que, al interactuar con el manto de carbón, lo oxida y enriquece en ciertos elementos químicos.

Las mayores concentraciones de la distribución de los óxidos de Hierro, Potasio, Magnesio y Sílice se encuentran hacia el centro del sinclinal, lo cual indica que su depositación dentro de la cuenca estaba controlada principalmente por un régimen continental, esto claro, al corroborar la influencia tanto continental, como mareal a la que estaba expuesta la cuenca.

Por último, cabe resaltar que, según lo observado durante la realización de este proyecto, la química inorgánica en los carbones esta principalmente ligada al ambiente de depositación de las turberas y las diagénesis posteriores, que a cualquier otro factor.

REFERENCIAS

- [1] J. E. Mariño Martínez and E. Amaya, "Lithofacies cyclicity determination in the guaduas formation (Colombia) using Markov chains", *Earth sci. res. j.*, vol. 20, no. 3, pp. B1-B9, Julio. 2016. <https://doi.org/10.15446/esrj.v20n3.44429>
- [2] J. A. Barrera Pongutá, "Determinación de la madurez térmica de los carbones de la formación guaduas en el Sinclinal Checua - Lenguazaque". (Trabajo de pregrado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso. (2016). Disponible en: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1691>
- [3] G. A. Sarmiento Pérez y C. L. Guatame, "Interpretación del Ambiente Sedimentario de los Carbones de la Formación Guaduas en el Sinclinal Checua-Lenguazaque a partir del análisis petrográfico", *Geología Colombiana*, pp. 41-58, enero. 2004.
- [4] J. S. Gómez Neita, M. D. López Carrasquilla, "Paleoenvironments of coals using organic petrography and their relationship with physicochemical properties, Guaduas formation, Checua-Lenguazaque syncline". (Trabajo de grado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso. (2017). Disponible en: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1875>
- [5] C. R. Ward, "Analysis, origin and significance of mineral matter in coal: An updated review".

International Journal of Coal Geology, no. 165, p.p. 1–27. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.07.014>

- [6] L. Thomas, “Coal Sampling and Analysis”. *Coal Geology*, L. Thomas, Ed. Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. pp. 137–149. DOI:10.1002/9781118385685
- [7] M. C. Valentinuzzi, “Análisis por Fluorescencia de Rayos X: Implementación de Guías de Haces en Reflexión Total”. Trabajo de Grado de Doctorado. Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. 2008.
- [8] F. Frandsen, “Empirical Prediction of Ash Deposition Propensities in Coal-Fired Utilities”. Department of Chemical Engineering Technical University of Denmark. Dinamarca, ene, 1997, pp. 3 – 6. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/594959>
- [9] Mohammad Zahari Sukimi Mat Zaid, Mazlan Abdul Wahid, Musa Mailah, Mohammad Amri Mazlan, and Aminuddin Saat, “Coal combustion analysis tool in coal fired power plant for slagging and fouling guidelines”, *AIP Conference Proceedings 2062*, pp. 1–7. enero, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5086575>
- [10] A. Badii, O. P. Guillen, S. Lugo, & J. J. Aguilar Garnica, “Correlación No-Paramétrica y su Aplicación en la Investigaciones Científicas. Non-Parametric Correlation and Its Application in Scientific Research”. *International Journal of Good Conscience*, vol. 9, no. 2, pp. 31–40, Agosto, 2014.
- [11] M. G. Kendall, B. B. Simith, “*Randomness and Random sampling numbers*”, pp. 103, 147-166, 1938. <https://doi.org/10.2307/2980655>

LÍNEAS ESTRATÉGICAS DE ACCIÓN SOSTENIBLE PARA LOS CENTROS DE ATENCIÓN MÉDICA DE LAS REGIONES DE COLOMBIA

Strategic lines of sustainable action for health care centers in Colombia regions

Karen Tatiana Valencia Rivero¹

¹Profesora Asociada, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Programa Ingeniería Industrial. Bogotá, Colombia. Investigadora principal, Biomedical Technology for Innovation, Research and Development – BIRD. Bogotá, Colombia. Email: valencia.karen@uniagraria.edu.co

(Recibido el 19 de noviembre de 2019 – Aceptado el 19 de mayo de 2020)

Resumen

Con el planteamiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó un plan de acción para el desarrollo de aspectos sociales, económicos y medioambientales a 2030. Este artículo busca analizar desde una perspectiva cualitativa la sostenibilidad en el campo hospitalario en diferentes partes del mundo donde han implementado estrategias bajo diferentes contextos socio-económicos y culturales que han ayudado a mejorar los procesos eficientemente mientras se reduce el impacto ambiental. La situación actual de la sustentabilidad hospitalaria a nivel global se tomará como punto de partida para proponer estrategias que permitan mejorar los servicios de salud en Colombia a través de la adopción de los métodos más eficientes y exitosos encontrados, que en conjunto con herramientas de la ingeniería industrial y de la ingeniería biomédica permitan abrir nuevos caminos para garantizar una vida saludable desde el cuidado del medio ambiente y de los servicios médicos que se prestan a la sociedad de forma sostenible.

Palabras clave: ingeniería industrial, ingeniería biomédica, logística hospitalaria, objetivos de desarrollo, sostenibilidad.

Abstract

The Sustainable Development Goals defined by the General Assembly of the United Nations, promote an action plan for the development of social, economic and environmental aspects that should be achieved before 2030. This article seeks to analyze from a qualitative perspective sustainable strategies implemented in hospitals at different countries where sustainable strategies were implemented under different socio-economic and cultural contexts, and successfully helped to efficiently improve processes while reducing their environmental impact. Current situation of hospital sustainability at a global level will be taken as a starting point to propose strategies that allow improving health services in Colombia through the adoption of the most efficient and successful methods found, which together with Industrial and Biomedical engineering tools will open new paths to ensure a healthy life.

Key words: industrial engineering, biomedical engineering, hospital logistics, sustainable development goals, sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

Hospitales y Sistemas de Salud a nivel mundial están incorporando prácticas sostenibles en su misión y sus operaciones, a su vez, encontrando formas de sobresalir, innovar y prosperar en la atención médica [1, 3].

Los de servicios de salud han realizado alianzas y han fortalecido estrategias con proveedores, pacientes y diferentes comunidades, fortaleciéndose mutuamente con la determinación de apoyar un servicio de salud de calidad en un planeta sano [4]. Hoy en día, existen hospitales que son completamente independientes de

la energía, hospitales que han reinventado el concepto de alimentos hospitalarios saludables al tiempo que respaldan un sistema alimentario sostenible, y hospitales que han utilizado sus voces y su poder de compra para cambiar la forma en que se fabrican los productos para el cuidado de la salud, evitando una gama de productos químicos tóxicos en muebles, productos de limpieza, dispositivos médicos y materiales de construcción, por nombrar algunos [5-7].

A través del análisis de los procesos dentro de las instituciones prestadoras de los servicios médicos se pueden definir criterios de calidad para establecer metas de mejora de procesos haciéndolos sostenibles a través del diseño, aplicación y evaluación de herramientas logísticas. En este artículo se analizan diferentes referentes bibliográficos donde se presentan herramientas sustentables bajo diferentes contextos socio-económicos y culturales, en países como Abu Dhabi [8], Estados Unidos [9,10], Brasil [11], Turquía [12], Polonia [13], Irán [14, 15], Canadá [16], México [17], India [18], Italia [19], Reino Unido [20], Bangladesh [21], y Kenia [22].

En el marco de la disponibilidad y accesibilidad de servicios integrales de salud en centros médicos en el país, el mejoramiento en la logística para el acceso a los servicios integrales de salud, la adopción de estrategias de gestión ambiental, la protección de los recursos naturales y humanos, el control de la contaminación, y el fomento de un cambio cultural para pasar de un consumo excesivo de recursos a un uso de energía y elementos cada vez menor o más racional, hacen que esta clase de propuestas tengan un alto impacto a nivel socio-económico, especialmente, donde la demanda de salud tiene los niveles más bajos de atención. A continuación, se categorizan las áreas de los hospitales susceptibles de modificar sus procesos por unos más sostenibles y se analiza su situación actual en los diferentes centros médicos.

2. SOSTENIBILIDAD HOSPITALARIA

En general, los pequeños proveedores de salud en las comunidades rurales, tienen un acceso limitado a

recursos laborales y de capital en comparación con sus homólogos más grandes; sin embargo, ellos enfrentan las mismas presiones regulatorias de la acreditación hospitalaria con respecto a la calidad de la atención al paciente y a la seguridad. Los hospitales y centros de salud pequeños pueden implementar estrategias a nivel empresarial que no solo creen un entorno de atención y seguridad de calidad, sino que también establezcan las bases para mejorar el control de costos mientras se siguen estrategias sostenibles que reduzcan el impacto ambiental y social de sus procesos [9].

Metodologías como la Lean que fueron inventadas por el Sistema de producción de Toyota (TPS) para superar las ineficiencias comerciales, han intervenido nuevos escenarios como el de la salud buscando responder a las necesidades de pequeñas y grandes empresas de distintos sectores [9]. El concepto Lean de minimización de residuos para la mejora de procesos se ha implementado recientemente en servicios como la atención médica, que ha adoptado este tipo de gestión para el desarrollo de un programa de mejora de procesos [23, 24]. Independientemente de la estrategia logística, de gestión, o de operaciones a utilizar, se espera que estas estrategias por lo menos respondan a La Triple Línea de Fondo que se ha definido internacionalmente y que es conocida como una integración de tres dimensiones de sostenibilidad: económica, ambiental y social, promoviendo una responsabilidad social corporativa [25, 26].

3. PROPUESTA DE SOSTENIBILIDAD HOSPITALARIA PARA LAS REGIONES DE COLOMBIA

Se propone implementar la Triple Línea de Fondo con el concepto lean para la minimización de residuos y mejora de procesos como el transporte, inventario, movimiento, tiempos de espera, sobre producción, y sobre procesamiento [27]; así mismo, se busca promover la satisfacción de los empleados y de los pacientes con la disponibilidad de citas, la calidad de la atención y la garantía de los servicios básicos, mejorando los procesos con herramientas logísticas y de gestión [28].

Con el Sistema de producción de Toyota (TPS), se puede especificar cómo se realiza el trabajo, cómo se transfiere el conocimiento entre los trabajadores y dentro del sistema, cómo se coordina la producción entre tareas y servicios, y cómo es el proceso controlado, medido y sostenido. Se propone el uso de reglas que también prescriben implícitamente la estructura organizacional y los sistemas de control que se requieren para implementar TPS de manera rentable y sostenible.

Se especifican a continuación cuatro reglas que forman la base de TPS como una aplicación adecuada dentro de los centros médicos: (i) Todo el trabajo debe estar altamente especificado en cuanto a contenido, secuencia, tiempo y resultado. (ii) Cada conexión cliente-proveedor debe ser directa, y debe haber una forma inequívoca de sí o no para enviar solicitudes y recibir respuestas. (iii) El camino para cada producto y servicio debe ser simple y directo. (iv) Cualquier mejora debe hacerse de acuerdo con el método científico, bajo la guía de un maestro, en el nivel más bajo posible de la organización [9].

Observaciones de los procesos en los centros de salud como se realizan en la actualidad, deben ejecutarse para, posteriormente, plantear estrategias entorno a oportunidades de mejora identificados. El desarrollo de herramientas tangibles para la resolución de problemas también puede incluirse en la ejecución de estrategias para el mejoramiento de procesos y su calidad. Dispositivos biomédicos pueden nacer de la identificación de necesidades, en este caso en el entorno hospitalario, al mismo tiempo, que la implementación de estrategias logísticas y de gestión se muestran necesarias en los procesos. La calidad de la observación y análisis de los procesos debe garantizar la correcta identificación de oportunidades de mejora de procesos y de creación de dispositivos biomédicos.

Respecto a la gestión de la cadena de suministro del servicio, este se debe basar en tres procesos (i) la gestión de procesos, (ii) la gestión de componentes, y (iii) la configuración de la red, lo que implica que los conceptos deben extraerse sobre la base de estos procesos

[15]. Adicionalmente, la información presentada con antelación, se plantean una serie de líneas estratégicas para observar en detalle y mejorar los procesos desde la sostenibilidad en los centros de atención de salud de las regiones de Colombia.

3.1. Huella Hídrica

La conservación y eficiencia en el uso del agua es fundamental. Se debe lograr el consumo de menos galones de agua por pie cuadrado, plantear proyectos de conservación y reducción del consumo de agua con el tiempo a través de la innovación.

3.2. Huella de Carbono

Se debe trabajar por el seguimiento y la medición de las emisiones de CO₂ y el desarrollo general de un programa climático. Los hospitales deben comprender los impactos del cambio climático en la salud y tomar medidas para mitigar esos impactos, principalmente, a través de la educación de su personal y de las comunidades para que desempeñen un papel de apoyo.

3.3. Eficiencia Energética

Se debe procurar una eficiencia energética y una planificación estratégica del uso de energía. Son necesarios administradores de energía y programas escritos para reducir el uso de energía con el tiempo. Se debe rastrear la intensidad del uso de energía, y procurar la transición a fuentes de energía renovables.

3.4. Manejo de Residuos

El manejo adecuado de materiales de residuo se debe demostrar a través de altas tasas de reciclaje, baja generación de desechos médicos regulados, y un claro enfoque en minimizar el volumen total de desechos generados por las instituciones.

3.5. Manejo de Residuos Químicos

Se deben propender políticas sólidas de reducción de químicos. Se propone abordar la toxicidad a través de programas de limpieza más ecológicos donde también se evite al máximo el uso de productos químicos perjudiciales, y se muestre interés por comprar productos, servicios

y equipos sostenibles. Así también, se debe eliminar el uso del mercurio y priorizar la capacitación del personal que maneja los productos químicos peligrosos para evitar accidentes y contaminaciones.

3.6. Alimentación Saludable de Pacientes

En el ámbito de los alimentos, se deben buscar estrategias como la reducción del consumo de carne, la adquisición de una mejor carne, el abastecimiento local y sostenible para la alimentación dentro de los hospitales, mejorando el acceso al agua del grifo y bebidas saludables, apoyando el acceso a alimentos saludables y evitando desechos alimentarios. También son necesarias políticas sólidas y estrategias educativas que aborden el sistema alimentario como un factor crítico dentro de un plan general de sostenibilidad para la salud humana.

3.7. Compras Ambientalmente Preferibles

Las políticas de compra, interacciones con proveedores, contratos ambientalmente preferibles son estrategias para reducir el impacto negativo de los prestadores de servicios de salud [10].

3.8. Construcciones Verdes

Aunque muchos de estos centros no están pensando en ampliar su infraestructura, se puede procurar con cierta proyección ambiental la ampliación o construcción de nuevas sedes, así como las renovaciones importantes, idealmente hacia la certificación LEED (Leadership in Energy & Environmental Design), y otros productos ecológicos innovadores. Este tipo de construcciones incluyen eficiencia energética y de agua, materiales más seguros, abastecimiento regional, integración de la naturaleza y entre otros mecanismos.

4. DISCUSIÓN

Las estrategias aquí propuestas no están exentas de ser afectadas por barreras que surjan en la implementación. Por nombrar algunas: la falta de actitud y compromiso al cambio de las personas involucradas en los procesos [29], falta de comprensión de la propuesta en los diferentes niveles organizacionales [30], falta de recursos

y limitaciones presupuestarias [31], un vínculo débil entre los programas de mejora y el nivel estratégico de la organización [32], así como, la falta de estrategias de mejora al largo plazo [31].

Adicionalmente, el sector de la salud es diferente de otros sectores debido a su complejidad dada por los dos aspectos profesionales diferentes que se encuentran en este sector: los profesionales médicos y los no médicos. Los profesionales médicos están familiarizados con los términos y conocimientos propios de su disciplina, mientras que los profesionales no médicos están tan calificados como los profesionales médicos, pero no disponen del conocimiento de conceptos médicos, aunque están debidamente capacitados para gestionar diferentes funciones de organización, y trabajan con una perspectiva diferente [12].

Esta perspectiva bilateral puede ser vista como un problema, pero en este artículo se propone como una oportunidad que de ser bien mediada por profesionales que entiendan ambos campos, como los ingenieros biomédicos, puede resultar en excelentes estrategias que integren interdisciplinariamente herramientas para la solución de problemas en el sector salud. Es necesaria la implementación de las estrategias aquí propuestas en pequeños centros de salud de diferentes regiones de Colombia para ampliar la visión del estudio y profundizar en las necesidades específicas de la población Nacional.

5. CONCLUSIÓN

Atendiendo al Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, es indispensable que las empresas, incluyendo las relacionadas con el sector salud, se comporten éticamente contribuyendo al desarrollo económico al tiempo que se mejora la calidad de vida de la fuerza laboral y sus familias, de la comunidad local, y de la sociedad en general. En este artículo, se propone el alcance de este objetivo a través de la vinculación de estrategias sostenibles en los centros de salud, promoviendo así no sólo un trabajo firme en pro del alcance de los objetivos de desarrollo sostenible, sino del

desarrollo en general de la sociedad colombiana.

REFERENCIAS

- [1] Silvius AG, Schipper R. A maturity model for integrating sustainability in projects and project management. 24th World Congress of the International Project Management Association (IPMA) Istanbul, Turkey; 2010.
- [2] Visser WAM. Sustainability reporting in South Africa. *Corp Environ Strat.* 2002;9(1):79–85.
- [3] Holliday C. Sustainable growth, the DuPont way. *Harv Bus Rev.* 2001;79(8):129–132.
- [4] Marimuthu M, Paulose H. Emergence of sustainability-based approaches in healthcare: expanding research and practice. *Procedia-Soc Behav Sci.* 2016;224:554–561.
- [5] WCED. World Commission on Environment and Development. Our common future. Oxford: Oxford University Press; 1987.
- [6] Deloitte & Touche. Business strategy for sustainable development: leadership and accountability for the 90s. IISD; 1992.
- [7] Elkington J. Cannibals with forks: the triple-bottom line for 21st century business. Canada: New Society Publishers; 1998.
- [8] Omar Awad AlJaberi, Matloub Hussain & Paul R. Drake (2017): A framework for measuring sustainability in healthcare systems, *International Journal of Healthcare Management*, DOI: 10.1080/20479700.2017.1404710
- [9] Kevin F. Collins & Senthil K. Muthusamy (2007) Applying the Toyota Production System to a Healthcare Organization: A Case Study on a Rural Community Healthcare Provider, *Quality Management Journal*, 14:4, 41-52, DOI: 10.1080/10686967.2007.11918045
- [10] Thomas M. Schieble MD, MBA (2008) Advertised Sustainability Practices Among Suppliers to a University Hospital Operating Room, *Journal of Hospital Marketing & PublicRelations*, 18:2, 135-148, DOI: 10.1080/15390940802232424
- [11] Higor Leite, Nicola Bateman & Zoe Radnor (2019): Beyond the ostensible: an exploration of barriers to lean implementation and sustainability in healthcare, *Production Planning & Control*, DOI: 10.1080/09537287.2019.1623426
- [12] Songul Cinaroglu (2016) Complexity in healthcare management: Why does Drucker describe healthcare organizations as a double-headed monster? *International Journal of Healthcare Management*, 9:1, 11-17, DOI: 10.1179/2047971915Y.0000000016
- [13] Justyna Przychodzen & Wojciech Przychodzen (2013) Corporate sustainability and shareholder wealth, *Journal of Environmental Planning and Management*, 56:4, 474-493, DOI: 10.1080/09640568.2012.685927
- [14] Yusef Shaabani, Ali Vafae Najar, Mohammad Naser Shafiee, Marziyhe Meraji & Elaheh Hooshmand (2019): Designing a green hospital model: Iranian hospital, *International Journal of Healthcare Management*, DOI: 10.1080/20479700.2019.1572265
- [15] Seyed Habibollah Mirghafoori1, Ali Morovati Sharifabadi1, Salim Karimi Takalo (2018): Development of Causal Model of Sustainable Hospital Supply Chain Management Using the Intuitionistic Fuzzy Cognitive Map (IFCM) Method, *Journal of Industrial Engineering and Management*, <https://doi.org/10.3926/jiem.2517>
- [16] Jennifer Y. Verma, Meghan Rossiter, Kirby Kirvan, Jean-Louis Denis, Stephen Samis, Kaye Phillips, Kim Venu, Donna Allen, G. Ross Baker, Mireille Brosseau, François Champagne, Catherine Gaulton, Erin Leith & Patty O’connor (2013) Going far together: Healthcare collaborations for innovation and improvement in Canada, *International Journal of Healthcare Management*, 6:2, 66-76, DOI: 10.1179/2047971913Y.0000000029
- [17] Gabriela Citlalli López-Torres, Jose Arturo Garza-Reyes, Gonzalo Maldonado-Guzmán, Vikas Kumar, Luis Rocha-Lona & Anass Cherrafi (2019) Knowledge management for sustainability in operations, *Production Planning & Control*, 30:10-12, 813-826, DOI: 10.1080/09537287.2019.1582091

- [18] Sirish Kumar Gouda & Haritha Saranga (2018) Sustainable supply chains for supply chain sustainability: impact of sustainability efforts on supply chain risk, *International Journal of Production Research*, 56:17, 5820-5835, DOI: 10.1080/00207543.2018.1456695
- [19] Silvia Barbero & Agnese Pallaro (2017) Systemic Design for Sustainable Healthcare, *The Design Journal*, 20:sup1, S2473-S2485, DOI: 10.1080/14606925.2017.1352762
- [20] Maria K. Triantafyllou & Tom J. Cherrett (2010) The logistics of managing hazardous waste: a case study analysis in the UK retail sector, *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 13:5, 373-394, DOI: 10.1080/13675567.2010.512150
- [21] Toufiq Ahmed & Kunio Shirahada (2019) Toward a sustainable healthcare service system in a limited resource context: Case study of Bangladesh rural advancement committee's healthcare system, *International Journal of Healthcare Management*, 12:2, 97-105, DOI: 10.1080/20479700.2017.1389512
- [22] W. Leal Filho, S. K. Tripathi, J. B. S. O. D. Andrade Guerra, R. Giné-Garriga, V. Orlovic Lovren & J. Willats (2019) Using the sustainable development goals towards a better understanding of sustainability challenges, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26:2, 179-190, DOI: 10.1080/13504509.2018.1505674
- [23] Hussain M, Khan M, Al-Aomar R. A framework for supply chain sustainability in service industry with confirmatory factor analysis. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016;55:1301–1312.
- [24] Hussain M, Malik M, Al Neyadi HS. AHP framework to assist lean deployment in Abu Dhabi public healthcare delivery system. *Bus Process Manag J.* 2016;22 (3):546–565.
- [25] Elkington J. *Cannibals with forks: the triple-bottom line for 21st century business.* Canada: New Society Publishers; 1998.
- [26] Kotler P, Lee N. *Corporate social responsibility: doing the most good for your company and your cause;* 2006.
- [27] NHSIII. *Going lean in the NHS, NHS intuitive for innovation and improvement*, Warwick; 2007. (cited 2014 Jul 14). Available from www.northamptongeneral.nhs.uk/Downloads/OurServices/ServiceImprovement/Toolsforimprovement/GoingleanintheNHS.pdf
- [28] Ramsaran-Fowdar RR. Identifying health care quality attributes. *J Health Hum Serv Adm.* 2005: 428–443.
- [29] Kinder, T., and T. Burgoyne. 2013. "Information Processing and the Challenges Facing Lean Healthcare." *Financial Accountability and Management* 29(3): 271–290. doi:10.1111/faam.12016.
- [30] Andersen, H., K. A. Røvik, and T. Ingebrigtsen. 2014. "Lean Thinking in Hospitals: is There a Cure for the Absence of Evidence? A Systematic Review of Reviews." *BMJ Open* 4(1): e003873. doi:10.1136/bmjopen-2013-003873.
- [31] Albliwi, S., J. Antony, S. Abdul Halim Lim, and T. Van der Wiele. 2014. "Critical Failure Factors of Lean Six Sigma: A Systematic Literature Review." *International Journal of Quality and Reliability Management* 31(9): 1012–1030. doi:10.1108/IJQRM-09-2013-0147.
- [32] Bhamu, J., and K. Singh Sangwan. 2014. "Lean Manufacturing: literature Review and Research Issues." *International Journal of Operations and Production Management* 34(7): 876–940. doi:10.1108/IJOPM-08-2012-0315.

COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL ENTRE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE IBAGUÉ Y EL REGLAMENTO NSR-10

Comparison of the analysis and structural design between the Ibague seismic microzoning and the NSR-10 regulation

Jean Paul Alejandro Toro Ruiz¹, Juan Sebastian Quintero Pinzón², Juan David Del Río Gaitán³

¹⁻³Universidad de Ibagué, programa de ingeniería Civil, Colombia.

Email: ¹2520161093@estudiantesunibague.edu.co, ²2520161074@estudiantesunibague.edu.co, ³juan.delrio@unibague.edu.co

(Recibido el 03 de abril de 2021 – Aceptado el 16 de junio de 2021)

Resumen

El diseño estructural es una rama esencial en la ingeniería civil y en el desarrollo de la sociedad, puesto que brinda sistemas estructurales seguros y eficientes para los diversos tipos de edificaciones y obras civiles necesarias para mejorar la calidad de vida de sus usuarios y ocupantes. Considerando lo anterior, en este proyecto se realizó un estudio en la ciudad de Ibagué en el cual se buscó determinar y comparar las variables requeridas para diseñar una estructura de concreto reforzado. Por esta razón, se comparan los coeficientes de amplificación sísmica del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) dados para los tipos de suelo más comunes en Ibagué y la microzonificación sísmica vigente de la ciudad, los cuales afectan y generan una variación en el sismo de diseño. Además de esto, se planteó el estudio de la capacidad de disipación de energía de la estructura para generar un análisis completo de las variables de diseño y obtener parámetros y recomendaciones seguras y óptimas para la ejecución del diseño estructural de edificaciones regulares con menos de 5 pisos. Se utilizó la herramienta BIM Revit, la cual permite tener información completa del proyecto estructural relacionada con los materiales y así estimar las variaciones entre los diferentes diseños obtenidos.

Palabras clave: *diseño estructural, microzonificación sísmica, NSR-10, sismo de diseño, coeficientes de amplificación, disipación de energía, BIM.*

Abstract

Structural design is an essential field in civil engineering and in the development of society, since it provides safe and efficient structural systems for the several types of buildings and civil works necessary to improve the quality of life of its users and occupants. Considering this situation, in this project, it was carried out a study in the city of Ibague in which it was sought to determine and compare the variables required to design a reinforced concrete structure. For this reason, the seismic amplification coefficients of the Colombian Seismic Resistant Construction Regulation (NSR-10) given for the most common types of soil in Ibague and the current seismic microzoning of the city are compared, which affect and generate a variation in the design earthquake. In addition, the study of the energy dissipation capacity of the structure was proposed to generate a complete analysis of the design variables and obtain safe and optimal parameters and recommendations for the execution of the structural design of regular buildings with less than 5 floors. The BIM Revit tool was used, which allows to have complete information of the structural project related to the materials and thus estimate the variations between the different designs obtained.

Key words: *structural design, Seismic microzoning, NSR-10, amplification coefficients, energy dissipation, BIM.*

1. INTRODUCCIÓN

La microzonificación sísmica es una herramienta que permite obtener valores exactos de los coeficientes de amplificación que afecta la aceleración de la zona en periodos cortos (F_a) e intermedios (F_v), por otro lado, el Reglamento sismo resistente NSR-10 atribuye valores de F_a y F_v según el tipo de suelo y la ubicación de forma general. Por lo cual existe una gran divergencia entre los diferentes sectores de la ciudad y su tipo de suelo, con respecto a los valores que atribuye el Reglamento. Por ende, se requiere un estudio detallado de las variables y parámetros que se pueden presentar en el proceso de diseño.

Así también, existe un parámetro esencial que es la aceleración espectral, el cual depende de algunos parámetros como lo son los coeficientes de amplificación en periodos cortos (F_a) e intermedios (F_v), además, de los coeficientes de aceleración (A_a) y velocidad (A_v) horizontal pico efectiva, entre otros; los cuales afectan y generan una variación en la aceleración sísmica. El NSR-10 plantea una formulación que integra los parámetros anteriormente mencionados que afectan la aceleración espectral, los cuales varían dependiendo únicamente de la ubicación y el tipo de suelo del proyecto, como resultado se observa una generalización del diseño estructural.

Por otro lado, la ciudad de Ibagué cuenta con una microzonificación sísmica que indica curvas de detalle para los valores de los coeficientes de amplificación (F_a , F_v) tomados en campo a lo largo de la ciudad. De igual importancia, otro factor fundamental en el diseño estructural es la capacidad de disipación de energía de las estructuras, que, en el Reglamento, para la ciudad de Ibagué, puede ser moderada (DMO) o especial (DES). Este parámetro también es considerado en la investigación para su análisis.

De acuerdo con el mapa de zonificación sísmica, las ciudades pueden avanzar en sus planes de desarrollo, en los cuales se define claramente las políticas de uso del suelo y las restricciones necesarias en ciertos tipos

de edificios. Al mismo tiempo, se puede adelantar un proyecto de mitigación del riesgo sísmico, a través del diseño de edificaciones, donde se identifican los efectos que un sismo máximo probable pueda producir en la zona donde ocurra [1].

Con base en los factores mencionados anteriormente, que influyen en la respuesta dinámica de la estructura, se busca analizar la diferencia en el diseño estructural de edificaciones regulares de concreto reforzado entre la microzonificación y el reglamento, para lo cual se seleccionó lugares en torno de la ciudad de Ibagué, de tal manera, que se contemple la sectorización y se extraigan coeficientes que presenten mayor divergencia. En este sentido, es posible analizar el comportamiento que se genera en las diferentes ubicaciones a partir de los resultados completos.

A partir de esta investigación se obtienen algunas recomendaciones para el diseño estructural en la ciudad de Ibagué, teniendo en cuenta las ubicaciones predeterminadas dentro de la ciudad y los parámetros que se utilizaron para el diseño basados en el Reglamento, de tal manera que, se tenga información de las variaciones en el comportamiento de las estructuras y su diseño.

A su vez, todo el modelamiento de la estructura se realizó con la herramienta Revit 2019 con el propósito de crear modelos inteligentes en formato 3D compatibles con la tecnología BIM. De igual forma, además del modelamiento estructural, el software Revit generó un cálculo de cantidades preciso que permite comparar las cantidades de los materiales estructurales, los cuales influyen directamente en los costos de obra en la ciudad.

2. ANTECEDENTES

A continuación, se presentarán los antecedentes teóricos y prácticos que generan aportes para la investigación, divididos en dos partes: en el primero, los aportes con respecto a la tecnología BIM, sus aplicaciones y casos históricos. El segundo, da cuenta de las investigaciones relacionadas con la microzonificación sísmica y la vulnerabilidad en las estructuras.

La utilización del BIM puede contribuir a toda la industria de la construcción en la reducción de pérdidas, generalmente, al influir en etapas más tempranas (por ejemplo, en el diseño) o en la etapa de ejecución de los proyectos. Sus alcances van más allá, cubriendo todos los espacios del periodo de vida y proceso constructivo de un plan, debido a que es un sistema capaz de reordenar ideas, coordinar los proyectos y trabajos de especialidades, además, estimula la función de laborar en grupo, así como servir de herramienta de administración y control a lo largo de la vida eficaz de la construcción (Fase de operación y mantenimiento del edificio) [2].

Además, se define como un grupo de metodologías de trabajo y herramientas caracterizado por la utilización de información de manera coordinada, coherente, computable y continua; utilizando una o más bases de datos compatibles que contengan toda la información en lo relacionado al inmueble que se pretende diseñar, edificar o utilizar. Esta información podría ser de tipo formal, asimismo, puede referirse a criterios como los materiales empleados y sus calidades físicas, los usos de cada espacio, la eficiencia energética de los cerramientos, etcétera [3].

Por otro lado, el mapa de microzonificación sísmica sirve para entablar los requisitos mínimos de diseño sismo resistente. Para cada punto que esté en el perímetro urbano o en el área de extensión de la localidad, la microzonificación sísmica instituye una explicación de diseño de tipo espectral (para cada una de las variaciones probables de construcciones en ciertos límites) de forma que cualquier construcción, diseñada con la descripción concedida, va a tener generalmente la misma posibilidad de padecer daño o colapso frente a un acontecimiento sísmico futuro [4].

Asimismo, hay otros tipos de estudios asociados con la microzonificación sísmica que identifican la vulnerabilidad, como lo son los estudios de vulnerabilidad física o vulnerabilidad social, o identifican medidas para la reducción del peligro como las tipologías edilicias recomendadas por microzonificación sísmica [5].

Finalmente, se pone en evidencia que los antecedentes y estudios realizados sobre microzonificación sísmica centrados en la vulnerabilidad que se puede generar con respecto a la normativa nacional NSR-10 no existen, lo que significa para este proyecto es un reto incrementar el conocimiento teórico, en la búsqueda de recomendaciones para evitar futuros daños o posibles fallas en las estructuras.

3. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico de esta investigación corresponde al enfoque cuantitativo, porque su característica principal, es medir la variación de los fenómenos de aceleración y amplificación del suelo. Para ello se desarrolló la metodología por fases, de forma que se presente un proceso continuo con el fin de tener claridad y orden en el progreso del proyecto.

Fase 1. Determinar la ubicación de las zonas de estudio

Para el desarrollo de esta fase, se usó el mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Ibagué, por el cual se determinó la ubicación exacta en el mapa de los puntos en los cuales se interceptan las curvas de valores F_a y F_v . Así mismo, se obtuvo también la cantidad de puntos a estudiar, de la misma manera, se definió su ubicación geográfica en el casco urbano de la ciudad de Ibagué donde se realizó y evaluó la diferencia en el comportamiento sísmico.

Fase 2. Precisar los parámetros sísmicos de las zonas de estudio

Para esta fase se tuvo en cuenta las variables que se presentaron al momento en el que se definieron los parámetros sísmicos, como lo son: el nivel de amenaza sísmica de la ciudad, los coeficientes de aceleración y los diferentes tipos de suelo que se presentan, mayoritariamente, en la ciudad de Ibagué, en paralelo con los coeficientes de amplificación suministrados por la microzonificación.

Fase 3. Establecer la tipología estructural estandarizada

Se definieron las características de la estructura como

lo son: el tipo de estructura, el material estructural y su resistencia, el sistema estructural, el número de pisos de la estructura, el número de ejes y la separación entre ejes. Asimismo, se definieron otros parámetros como lo son: las irregularidades, el grupo de uso, el método de análisis sísmico y las solicitaciones de carga viva y muerta.

Por otra parte, en el desarrollo de esta fase se agregó otro criterio para el análisis y comparación de parámetros, como lo es la capacidad de disipación de energía permitida en la ciudad de Ibagué.

Fase 4. Análisis y Diseño sismorresistente

Para la fase de análisis y diseño sismorresistente se determinaron características tales como: la aceleración espectral y el cortante sísmico en la base con el fin de obtener un predimensionamiento para que cumpliera con la verificación de las derivas. Este proceso se realizó con cada una de las zonas de estudio seleccionadas, y además de eso, también se realizó el proceso con los tipos de suelo más comunes en la ciudad de Ibagué. Después de cumplir con las derivas de cada una de las estructuras, se procedió a la etapa de diseño.

Se tuvo en cuenta en esta etapa las combinaciones de carga, las envolventes y el coeficiente de disipación de energía de la estructura para obtener las fuerzas de diseño, tanto para DES como para DMO, y se realizó su respectivo diseño.

Fase 5. Realización dibujos y planos estructurales

En esta fase se utilizó el software REVIT con el cual se realizó el dibujo y los despieces de todos los elementos estructurales ya diseñados en la fase previa; todo el modelamiento y dibujo de la estructura se realizó en formato 3D, siendo esta una herramienta esencial e innovadora con la cual todos los parámetros de diseño se acercan a la realidad constructiva implementando tecnología BIM.

Fase 6. Obtención de cantidades

Para esta fase se realizó la obtención de cantidades de obra necesarias para cada pórtilo diseñado usando el

software REVIT, mediante el cual se hizo el cómputo de cantidades de concreto y acero de refuerzo.

4. RESULTADOS

Las ubicaciones seleccionadas se distribuyeron en el mapa de Ibagué con el fin de tener varios puntos de referencia de acuerdo con las diversas magnitudes de F_a y F_v en la ciudad, por consiguiente, se definieron 5 ubicaciones que se indican a continuación:

- Barrio Comfenalco: Carrera 20Sur Calle 112.
- Barrio el Salado: Carrera Octava calle 141.
- Barrio la Francia: Avenida Ferrocarril calle 26.
- Barrio la Gaviota: Carrera 16B calle 97.
- Barrio la Pola: Carrera segunda calle 7.

La Figura 1 muestra la distribución de las ubicaciones a lo largo de la ciudad, con su respectiva ubicación en comunas.

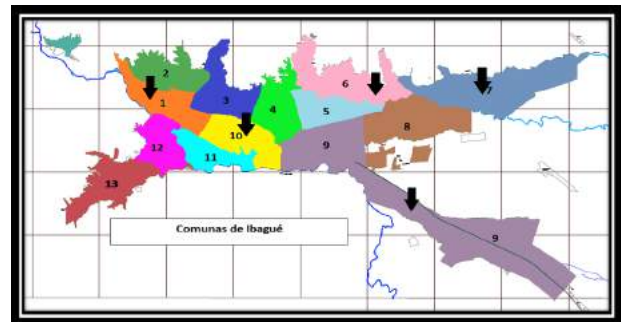


Figura 1. Ubicaciones de estudio en el mapa de Ibagué.

Así mismo, se precisaron los parámetros sísmicos generales para la ciudad de Ibagué, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros sísmicos establecidos por el reglamento NSR-10 para Ibagué.

Ciudad	Ibagué
Aa	0.20
Av	0.20
Ae	0.15
Ad	0.08
Zona de amenaza sísmica	Intermedia

De acuerdo con la definición de los parámetros sísmicos, se determinan los coeficientes de amplificación (F_a , F_v) en sitio de las ubicaciones previamente seleccionadas, y además de los tipos de suelo C, D y E que son los más comunes en la ciudad de Ibagué como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de amplificación de los tipos de suelo y las ubicaciones.

Ubicación o Tipo de suelo	F_a	F_v
Comfenalco	1	1.15
Salado	1.25	1.45
La Francia	1.2	1.25
La Gaviota	1.5	1.4
La Pola	1.15	1.8
Suelo C	1.2	1.6
Suelo D	1.4	2
Suelo E	1.7	3.2

En concordancia con la tipología estructural estandarizada, se determinó realizar el estudio por el método de la fuerza horizontal equivalente (FHE) por tratarse de una estructura regular aporticada de concreto, con uso de ocupación normal, una resistencia de 28MPa, de 5 niveles, con una altura por nivel de 3 metros. Del mismo modo, se determinó que la cantidad de ejes por sentido iban a ser 4 metros, separados entre sí a 4 metros desde su eje central. En la Figura 2, se muestra el modelo de la estructura.

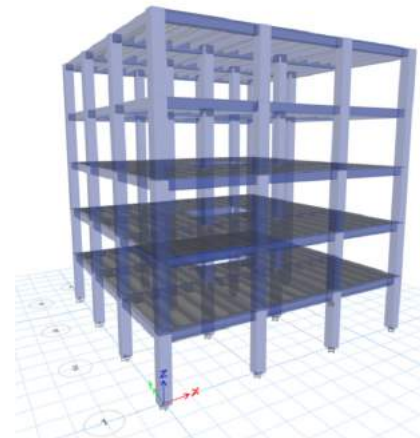


Figura 2. Estructura estandarizada.

Después de obtener todos los parámetros de aceleración y de sitio, además del grupo de uso y el coeficiente de importancia de la estructura, se procede a determinar el espectro de diseño, de manera general, como se muestra a continuación, están todas las aceleraciones espectrales de las 5 ubicaciones por microzonificación y los 3 tipos de suelo más comunes en Ibagué.

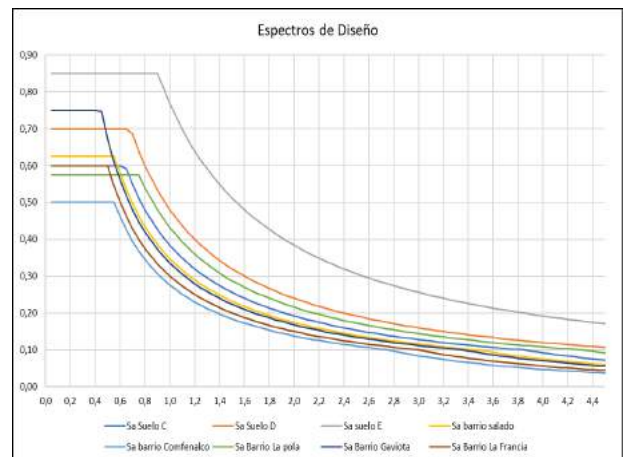


Figura 3. Espectros de diseño.

Se prosigue a predimensionar la estructura para que cumpla con las solicitaciones de carga muerta, carga viva, los efectos sísmicos y no sobrepase los desplazamientos máximos permitidos por el Reglamento. Para esta investigación se realizó el proceso de análisis y diseño estructural para dos disipaciones de energía, DMO y DES,

que son permitidas para el nivel de amenaza sísmica de la ciudad de Ibagué.

Posteriormente, en un proceso iterativo en el cual se determinaron las dimensiones de cada estructura, para que así cumpliera los requisitos geométricos mínimos, con las cargas de servicio. De esta manera, se obtuvo las dimensiones de columnas, vigas, viguetas como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones de las estructuras.

Ubicación Elemento	Columna (cm)	Viga (cm)	Vigueta (cm)
Comfenalco	45x45	30x40	12x30
Salado	45x45	35x45	12x30
La Francia	45x45	30x45	12x30
La Gaviota	50x50	30x45	12x30
La Pola	45x45	30x40	12x30
Suelo C	45x45	30x45	12x30
Suelo D	50x50	35x45	12x30
Suelo E	50x50	40x50	12x30

Después de obtener el dimensionamiento adecuado, se procede a verificar las derivas, con el fin de no sobrepasar el desplazamiento máximo permitido por el NSR-10, el cual corresponde al 1% de la altura de piso.

Lo anterior, con el fin de evitar deformaciones inelásticas, la inestabilidad global de la estructura y el pánico en las personas que se encuentran en la misma durante un evento sísmico. La siguiente ilustración muestra el chequeo de las derivas de todas las estructuras.

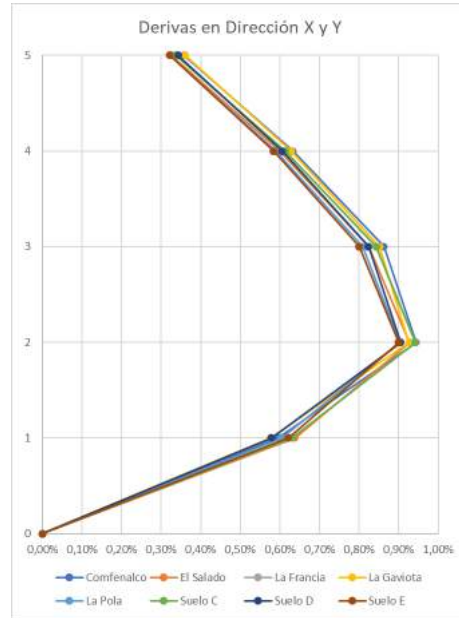


Figura 4. Chequeo de derivas de las estructuras.

Los elementos estructurales de una edificación deben diseñarse bajo todas las solicitaciones de carga establecidas por el avalúo, mayoradas y combinadas como se exige por el reglamento. De ahí se establecen también unos parámetros sísmicos, los cuales se deben reducir con un coeficiente de capacidad de disipación de energía con el fin de obtener las fuerzas sísmicas para el diseño reducido.

Luego de obtener las cargas de diseño reducidas, se procede a realizar el diseño tanto de vigas como de columnas; como se mencionó anteriormente, se realizó el diseño del pórtico más cargado de la estructura, de tal manera que, se evitara sobrecargas de información, y una optimización de esta. Dicho esto, se procede a determinar el diseño tanto de vigas, como de columnas. Este diseño se realizó por el método de la resistencia última.

Mediante el software Revit se realizó el dibujo del acero de refuerzo para columnas y vigas, además de sus respectivas dimensiones para las mismas, el proceso fue mediante el modelado y el dibujo en 3D para que así, después de tener dibujados los aceros, mediante cortes en el plano se pudiese crear sus respectivos despieces y

planos en 2D. Como se muestra en la siguiente figura el pórtico con sus respectivos aceros.

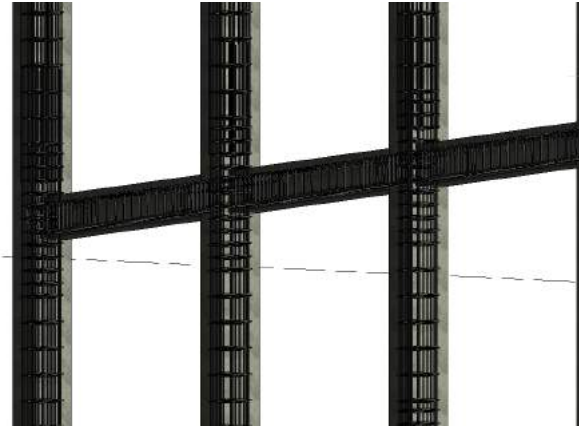


Figura 5. Pórtico con su acero de refuerzo.

El proceso de diseño y dibujo se realizó tanto para la disipación de energía moderada, como la especial, donde visualmente se pueden observar variaciones muy grandes con respecto a la cantidad de acero, para observar dichas diferencias, en la siguiente ilustración se mostrará cómo se ve una columna diseñada en disipación de energía moderada y una diseñada en disipación especial en 3D.

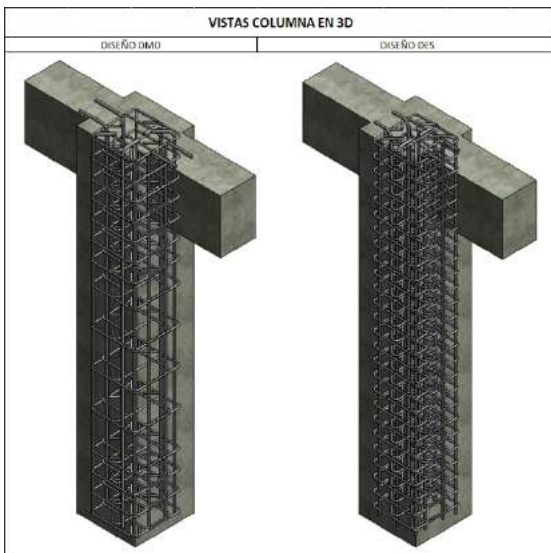


Figura 6. Columna diseñada en DMO y DES en vista 3D.

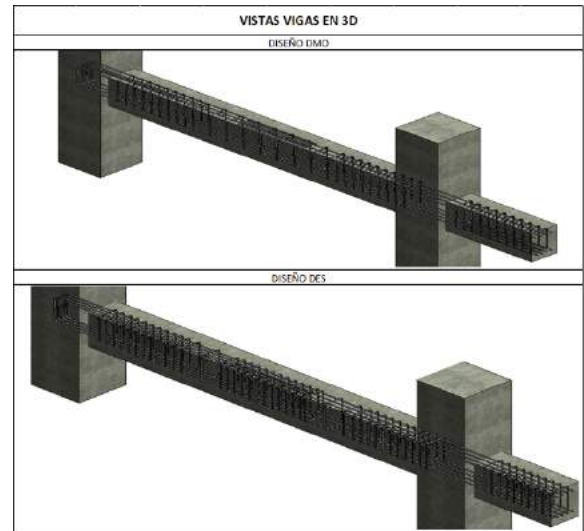


Figura 7. Viga diseñada en DMO y DES en vista 3D.

Finalmente, se llega a la herramienta por la cual se puede determinar las diferencias estructurales, reflejadas en las cantidades de obra, las cuales son el resultado del proceso de análisis y diseño estructural. Dicho proceso se realizó mediante la herramienta que tiene el software Revit, el cual permite realizar el cómputo de cantidades de manera predeterminada, que, en este caso, se realizó para el concreto de 28 MPa del pórtico más cargado de la estructura, y también a el acero de refuerzo de los elementos tipo viga y columna del pórtico anteriormente mencionado.

Para el barrio Comfenalco el espectro tenía un valor menor al valor del tipo de suelo C, y en el cálculo de cantidades para la disipación moderada (DMO) efectivamente las cantidades de aceros dieron 6% menos que el tipo de suelo C, analizándose de esa manera, a pesar de la similitud con el tipo de suelo C, al momento de diseñar y catalogarlo como dicho tipo de suelo, se estaría gastando 6% de acero de refuerzo con respecto a la microzonificación, como se muestra a continuación.

Tabla 4. Cantidad de acero de refuerzo barrio Comfenalco.

COMFENALCO				
ESTRUCTURAS	Microzonificación sísmica	DMO		
		Suelo Tipo C	Suelo Tipo D	Suelo Tipo E
AGROS				
Bastones (Kg)	57,95	26,03	59,84	48,92
Estribos Columnas (Kg)	730,89	809,71	1124,5	1128,21
Estribos Vigas (Kg)	286,34	280,84	303,52	323,04
Longitudinales Columnas (Kg)	1452,66	1449,82	1713,9	1728,25
Longitudinales Vigas (Kg)	434,69	562,08	562,47	706,59
TOTAL (Kg)	2962,53	3128,48	3761,23	3935,01
AUMENTO PORCENTUAL	0%	6%	27%	33%

En el análisis sísmico del barrio el Salado se notó que la aceleración espectral de la microzonificación era mayor respecto al tipo de suelo C de manera mínima. Produciendo así una variación en el diseño de disipación moderada que se notó en el cálculo de cantidades. Puesto a que la estructura de la microzonificación tiene 3% más de acero respecto al tipo de suelo C. De esta manera, en el barrio el salado no se puede catalogar el tipo de suelo C para el diseño estructural, debido a que se puede generar una vulnerabilidad en la estructura.

Tabla 5. Cantidad de acero de refuerzo barrio el Salado.

EL SALADO				
ESTRUCTURAS	Microzonificación sísmica	DMO		
		Suelo Tipo C	Suelo Tipo D	Suelo Tipo E
AGROS				
Bastones (Kg)	41,33	26,03	59,84	48,92
Estribos Columnas (Kg)	790,72	809,71	1124,5	1128,21
Estribos Vigas (Kg)	302,9	280,84	303,52	323,04
Longitudinales Columnas (Kg)	1522,28	1449,82	1713,9	1728,25
Longitudinales Vigas (Kg)	575,96	562,08	562,47	706,59
TOTAL (Kg)	3233,19	3128,48	3764,23	3935,01
AUMENTO PORCENTUAL	0%	-3%	16%	22%

Continuando con el barrio la Francia, se observa una característica especial, puesto que el sismo de diseño de la microzonificación presenta la misma aceleración que el tipo de suelo C, con la única diferencia en su periodo corto, pero que, para este caso, no presenta ningún tipo de afectación. Al no presentar afectaciones, las cantidades de acero entre la microzonificación y el suelo C son iguales. Siendo así, se puede confirmar que se puede

diseñar en el barrio la Francia con las características del reglamento NSR-10 respecto a los coeficientes de sitio.

Tabla 6. Cantidad de acero de refuerzo barrio la Francia.

LA FRANCIA				
ESTRUCTURAS	Microzonificación sísmica	DMO		
		Suelo Tipo C	Suelo Tipo D	Suelo Tipo E
AGROS				
Bastones (Kg)	26,92	26,03	59,84	48,92
Estribos Columnas (Kg)	836,28	809,71	1124,5	1128,21
Estribos Vigas (Kg)	303,52	280,84	303,52	323,04
Longitudinales Columnas (Kg)	1386,06	1449,82	1713,9	1728,25
Longitudinales Vigas (Kg)	565,28	562,08	562,47	706,59
TOTAL (Kg)	3118,06	3128,48	3764,23	3935,01
AUMENTO PORCENTUAL	0%	0%	21%	26%

En el barrio la Gaviota se presenta la condición especial donde el periodo de la estructura en el que se determina la aceleración en la microzonificación se encuentra en la curva descendente, lo cual genera que el valor de la aceleración sea similar a la aceleración del tipo de suelo D, generando así que el tipo de suelo D en la disipación moderada tenga 1% más de acero con respecto al valor de la microzonificación. Cabe resaltar que el valor de la aceleración se ve muy afectado por el periodo de la estructura, por lo cual se debe realizar un análisis minucioso del periodo de la estructura para determinar cuál es el valor real de la misma, que afecta el diseño, aclarando que el periodo corto de la microzonificación tiene un valor bajo respecto a los demás.

Tabla 7. Cantidades de acero de refuerzo barrio la Gaviota.

LA GAVIOTA				
ESTRUCTURAS	Microzonificación sísmica	DMO		
		Suelo Tipo C	Suelo Tipo D	Suelo Tipo E
AGROS				
Bastones (Kg)	42,78	26,03	59,84	48,92
Estribos Columnas (Kg)	1127,21	809,71	1124,5	1128,21
Estribos Vigas (Kg)	280,84	280,84	303,52	323,04
Longitudinales Columnas (Kg)	1718,56	1449,82	1713,9	1728,25
Longitudinales Vigas (Kg)	568,99	562,08	562,47	706,59
TOTAL (Kg)	3738,38	3128,48	3764,23	3935,01
AUMENTO PORCENTUAL	0%	-16%	1%	5%

Finalmente, para el barrio la Pola mediante la aceleración

espectral se determinó que la microzonificación presenta un valor similar al tipo de suelo C, sin embargo, la microzonificación tiene un valor menor. Por ende, determinar que el suelo del barrio la Pola es tipo C, se asumiría que se presenta un aumento en las cantidades de acero del 1% respecto a la microzonificación, cabe aclarar que las cantidades que se realizaron son del pórtico más cargado, por lo que, en una estructura de gran magnitud, ese 1% puede presentar un gran ahorro en la cantidad de acero de refuerzo.

Tabla 8. Cantidades de acero de refuerzo barrio la Pola.

LA POLA				
ESTRUCTURAS	Microzonificación sísmica	DMO		
		Suelo Tipo C	Suelo Tipo D	Suelo Tipo E
AGROS				
Bastones (Kg)	25,71	26,03	59,84	48,92
Estribos Columnas (Kg)	831,64	809,71	1124,5	1128,21
Estribos Vigas (Kg)	280,84	280,84	303,52	323,04
Longitudinales Columnas (Kg)	1366,59	1449,82	1713,9	1728,25
Longitudinales Vigas (Kg)	581,27	562,08	562,47	706,59
TOTAL (Kg)	3086,05	3128,48	3764,23	3935,01
AUMENTO PORCENTUAL	0%	1%	22%	28%

Con respecto a las cantidades de acero de refuerzo en la disipación especial (DES), se analizó que, debido a las solicitudes más estrictas en el diseño, las cantidades se mantuvieron en un mismo rango similar entre la microzonificación y el tipo de suelo más similar.

Finalmente, en todos los casos de estudio que en todos los casos para DES, el aumento más significativo en las cantidades de acero de refuerzo con respecto al diseño en DMO fueron los estribos en las columnas puesto a que en este diseño todas las columnas se encontraban confinadas debido a las restricciones de dicha disipación.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo se desarrolló con el fin de profundizar en el diseño estructural, con un procedimiento completo que abarca desde el análisis sísmico hasta el detallado y elaboración de planos, consiguiendo resultados que se pueden utilizar para el diseño, ejecución de proyectos y

como herramienta de orientación académica.

Se identificaron los sectores de la ciudad de Ibagué que presentan características especiales, por la diferencia que existe entre la microzonificación sísmica y el reglamento NSR-10. A partir del análisis de resultados, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Para el barrio Comfenalco se concluyó que el valor arrojado en el espectro de diseño por la microzonificación se encuentra por debajo del espectro determinado por el tipo de suelo C. Así que, si se cataloga este sector con este tipo de suelo se pueden generar sobre diseños y por ende sobrecostos en la estructura del 6%.

En el barrio la Francia se determinó que la microzonificación presenta las mismas características del tipo de suelo C en la aceleración. Sin embargo, presentó variaciones en los periodos cortos de los espectros de diseño, en consecuencia, esto puede afectar a las edificaciones según su altura y puede encontrarse fuera de este rango lineal del espectro.

Se estableció en el barrio el Salado que el espectro de la microzonificación sísmica se encuentra por encima del espectro determinado por el tipo de suelo C, según el Reglamento. Si se llegase a catalogar como tipo de suelo C, se generaría vulnerabilidad en el diseño estructural respecto a la microzonificación sísmica en el acero de refuerzo del 3%.

En el barrio la Gaviota se encontró que el periodo corto según la microzonificación sísmica tiene un valor pequeño, por ende, el valor de la aceleración espectral depende de la altura de la estructura, como consecuencia, su ubicación en el espectro se ve afectada únicamente por el periodo de la estructura.

Para el barrio la Pola se concluyó que se puede diseñar con las características del tipo de suelo C, debido a que sus condiciones son similares con respecto a la microzonificación, con la ventaja de que se estaría generando un rango de seguridad del 1% respecto a la

microzonificación.

Respecto a los parámetros de diseño que se obtuvieron se determinaron las siguientes conclusiones:

De acuerdo con el análisis de resultados y considerando la microzonificación sísmica de Ibagué, se determina que la aceleración espectral para el barrio Comfenalco produce el menor valor de cortante basal en las estructuras tipo. Por otra parte, en el barrio la Gaviota se presenta la mayor aceleración espectral para la estructura tipo.

Para los barrios Salado, la Pola y la Francia se tienen variaciones menores al 3% en el valor de la aceleración espectral por microzonificación sísmica respecto a la obtenida considerando tipo de suelo C.

Las derivas se ven afectadas directamente por la aceleración espectral que se define por los valores de la microzonificación y del Reglamento. No obstante, las estructuras analizadas para diferentes sectores presentan derivas similares, porque se manejó la misma tipología estructural.

Para el diseño con disipación especial de energía (DES) no es conveniente el detallado del refuerzo con barras comerciales de 6 metros, ya que induce a un mayor número de traslapes y por consiguiente de zonas confinadas, incrementando así la cantidad de acero en las secciones longitudinales. Para esto, se puede considerar el uso de barras comerciales de 12 metros particularmente en elementos horizontales.

Con relación a los tipos de disipación de energía permitidos para la ciudad de Ibagué, se determinó que en estructuras regulares la consideración de disipación especial de energía reduce las fuerzas sísmicas, pero no implica una reducción en la cantidad de refuerzo necesaria para satisfacer los requisitos del Reglamento.

Considerar el efecto de irregularidades estructurales. Las irregularidades estructurales influyen directamente en el comportamiento de la estructura frente a las fuerzas

horizontales y sus desplazamientos, asimismo, afectan el coeficiente de disipación de energía R que determina la magnitud de las fuerzas sísmicas de diseño.

Evaluar por medio de análisis dinámico. Por medio de este análisis se consideran factores adicionales que determinan un comportamiento estructural más aproximado a la realidad. Tales como, modos de vibración, periodos y corrección en el cortante basal; también permite realizar análisis a estructuras de gran altura y con cualquier tipo de irregularidad estructural.

Diseño de múltiples sistemas estructurales. Teniendo en cuenta la posibilidad de proyectar con diferentes sistemas estructurales en la ciudad de Ibagué, es conveniente evaluar los resultados de diseño con sistemas diferentes a los pórticos resistentes a momentos, ya que cada sistema tiene sus propias características geométricas y mecánicas que influyen directamente en la cantidad de los materiales.

REFERENCIAS

- [1] Secretaria de planeación Ibagué; IGAG, Mapa de Microzonificación sísmica, Ibagué, 2014.
- [2] G. J. GOYZUETA BALAREZO y H. PUMA LUPO, IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA BIM Y EL SISTEMA LAST PLANNER 4D PARA LA MEJORA DE GESTION DE LA OBRA "RESIDENCIA MONTESOLDOLORES"-TOMO I, Arequipa, 2016.
- [3] P. Eloi Coloma, «INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA BIM,» 2008.
- [4] Universidad de los andes, CEDERI, Alcaldía de Ibagué, «Estudios de amenaza, respuesta dinámica y microzonificación sísmica para la ciudad de Ibagué,» 2006.
- [5] K. C. M. M. S. J. J. H. CARLOS PADRÓN, «La microzonificación sísmica en el proceso de planificación urbana,» Revista de la facultad de ingeniería U.C.V, 2011.
- [6] R. R. Awad, Análisis y diseño sísmico de edificios, Medellín, 2012.
- [7] J. O. Montoya V., Elementos de concreto reforzado

I, 2017.

- [8] Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10, 2010.

MOL2ALL-VIDEOJUEGO PARA EL APRENDIZAJE DE LA ESTEQUIOMETRÍA: IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DEL JUEGO Y PERFIL DEL JUGADOR

Mol2all-video game for the stoichiometry learning: identification of the characteristics game and player's profile

Víctor Hugo Medina García¹, Laura Marcela Rincón Pérez², Jorge Enrique Otálora Luna³

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de investigación GICODE, Colombia. ²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigación SIMILES, Colombia. ³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigación GIS, Colombia. E-mail: ¹vmedina@udistrital.edu.co, ²laura.rincon08@uptc.edu.co, ³jorge.otalora@uptc.edu.co

(Recibido mayo 22 de 2021 y aceptado junio 15 de 2021)

Resumen

Para gran parte de los estudiantes de educación media aprender estequiometría es complejo porque presentan deficiencias de lógica matemática y manejo de proporciones. Esta situación desmotiva al estudiante durante su proceso de aprendizaje lo que agudiza el problema de comprensión de dicha temática. Se una investigación que dará como resultado la implementación de un videojuego serio que motive el aprendizaje de los cálculos estequiométricos. El alcance del presente artículo es la presentación del estudio realizado para determinar los perfiles de los estudiantes en rol de jugadores, y las características que deberá tener del videojuego que se denominará Mol2All. Para lograrlo, se usó una investigación cuantitativa, con enfoque sintético y diseño cuasi experimental. Se concluye que el perfil del estudiante como jugador está acorde con la metodología de Richard Bartle, además, el estudio arroja que la población que será beneficiaria del videojuego es amplia, sin importar su estrato socioeconómico, su zona de residencia, su género o si la institución educativa es de carácter público o privado. También se determinó que se deberán emplear tecnologías livianas adaptables a todo tipo de dispositivo electrónico en la construcción de Mol2All.

Palabras clave: videojuego serio, estequiometría, enseñanza de la química, aprendizaje de la estequiometría.

Abstract

For a large part of high school students learning stoichiometry is complex because they have deficiencies in mathematical logic and handling of proportions. This situation demotivates the student during their learning process, which exacerbates the problem of understanding this topic. This study proposes an investigation that will result in the implementation of a serious video game which motivates the learning of stoichiometric calculations. The scope of this article is the presentation of the study carried out to determine the profiles of the students in the role of players, and the characteristics of the video game that will be called Mol2All should have. In order to achieve it, this study used quantitative research, with a synthetic approach and a quasi-experimental design. It concluded that the profile of the student as a player is in accordance with Richard Bartle's methodology, in addition, the study shows that the population that will benefit from the video game is wide, regardless of their socioeconomic status, their area of residence, gender or whether the educational institution is public or private. It was also determined that is important to use lightweight technologies adaptable to all types of electronic devices to be used in the construction of Mol2All.

Key words: serious videogame, stoichiometry, chemistry teaching, stoichiometry learning.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del proceso de enseñanza – aprendizaje de la estequiometría, se propone el uso de una herramienta didáctica de apoyo, mediada por un videojuego serio, que motive la comprensión de dicha temática entre los estudiantes de educación media. En la revisión bibliográfica llevada a cabo para determinar cuáles son las dificultades prevalentes en el aprendizaje de los cálculos químicos. Según Obando, Bridges y Galagovsky et al., gran parte de los estudiantes de secundaria presentan falencias en: los razonamientos lógico-matemáticos, interpretaciones, proporciones, entre otras; por lo tanto, tienden a desmotivarse durante el proceso de aprendizaje de la estequiometría [1], [2] y [3].

Por otra parte, Martínez, M. y De Longhi, A., elaboraron una categorización de las dificultades de la lectocomprensión de los problemas estequiométricos de lápiz y papel – dificultades detectadas a partir del estudio efectuado por Martínez en 2011-. Los resultados obtenidos les permitieron concluir que, las dificultades de lectocomprensión de estos estudiantes no se relacionan únicamente con la habilidad lectora, sino que tienen causas diversas, como las relacionadas con el texto, con la química como disciplina y con los procesos de resolución que exigen los enunciados de los problemas estequiométricos [4].

En cuanto a las estrategias didácticas actuales para abordar la temática de estequiometría, se tienen las basadas en: la Enseñanza para la Comprensión (EPC), el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), así como aquellas que incluyen: el uso de analogías, integración de TIC e inserción de juego en la secuencia didáctica. La estrategia EPC tuvo mayor éxito en el aprendizaje de la estequiometría por encima del ABP porque: permite la división de temas en módulos más sencillos, implica menor autonomía del estudiante y su curva de aprendizaje es más efectiva, debido a que dista en menor medida al modelo tradicional [5].

Las analogías permiten el uso de un lenguaje simbólico desde modelos que recrean la cotidianidad de los

estudiantes y les facilita transponer los conceptos desde el contexto macroscópico al nanoscópico; de esta manera, se propicia la apropiación del conocimiento, siendo el estudiante parte activa en su proceso de aprendizaje de la estequiometría [6].

Adicionalmente, se ha evidenciado que la inserción de las analogías permite la diversificación de la estrategia con la que se presenta la estequiometría, produciendo un efecto motivador, ya que relaciona la cotidianidad y los estudiantes lo valoran de manera positiva [7] y [8].

Existen experiencias en las que se incluyeron las TIC para guiar cursos de estequiometría como las de Obando y Mojica. En la primera, se destaca la motivación que mostraron los estudiantes, así como la posibilidad del seguimiento personalizado que pudo realizar el docente durante el proceso de aprendizaje [1]. La segunda, describe el fortalecimiento de experiencias significativas en el aprendizaje del estudiante, mediante cuatro elementos en la generación de conocimiento: diálogo, reflexión, discusión y consenso [9]. Además, recomiendan la elaboración de un aula virtual que contenga situaciones cotidianas para generar un aprendizaje significativo y que el estudiante adquiera un papel activo en su aprendizaje.

En cuanto a la inclusión de un juego en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la estequiometría, existe un estudio que lo aborda como herramienta motivadora dentro de una estrategia didáctica, la cual fue aceptada y aprobada por el 88.9% de los estudiantes objeto de estudio. A nivel actitudinal, los estudiantes afirmaron que se sintieron más motivados e interesados en el tema, fomentaron el trabajo en equipo y desarrollaron habilidades para la competencia entre equipos de juego; resaltando que, el juego didáctico permite la ruptura de esquemas tradicionales de enseñanza y, facilita a los educandos crear su propia estrategia de cómo resolver un ejercicio y su relación con los aspectos conceptuales [10].

Acerca del uso de videojuegos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la estequiometría no hay aún suficiente estudio, sin embargo, si se ha aplicado

en la enseñanza de la química en general; es el caso de Abella y García, quienes encontraron que el estudiante profundiza en la naturaleza discontinua de la materia, se divierte y se favorece la comunicación, debido a que en los juegos los estudiantes adquieren un papel activo y son actores principales de su aprendizaje. Como valor agregado, se podrían incluir videojuegos que motiven la comprensión de la naturaleza discontinua de la materia, así como las relaciones matemáticas que prevalecen en sus transformaciones [11].

Los videojuegos como herramienta didáctica aportan beneficios de motivación a los estudiantes y les permite afianzar su autonomía en ambientes educativos, además, fortalecen la autoconfianza y la autoestima, posibilitan el trabajo colaborativo y fomentan la creatividad [12]. En este artículo se plantea que incluir un videojuego como instrumento de apoyo, estimula la resolución de problemas y el mejoramiento de habilidades motoras y cognitivas [13], éstas coinciden con las estrategias que pueden establecerse para superar dificultades detectadas en el proceso de enseñanza y sobretodo del aprendizaje significativo de la estequiometría.

2. METODOLOGÍA

La finalidad de esta investigación es determinar si al incluir un videojuego serio como herramienta didáctica de apoyo, se motiva el aprendizaje de los cálculos estequiométricos, se acudió a un método cuantitativo, de enfoque sintético y diseño cuasi experimental [14].

2.1. Población

El estudio se aplicó a un total de 28 estudiantes matriculados de la Institución Educativa José María Silva Salazar del municipio de Buenavista, Boyacá, se realizó un muestreo por conveniencia.

2.2. Recolección de datos

Los test de diagnóstico y de Bartle propuesto en 2005, así como los Pre-test y Post-test se aplicaron virtualmente dada la situación suscitada por la pandemia por SARS-CoV-2 (coronavirus), así como la aplicación del

instrumento, el videojuego serio “Mol2All”.

2.3. Procedimiento

FASE 1. Caracterización del nivel de interpretación de ecuaciones químicas por parte de los estudiantes. Se aplicó un test para recolectar información sobre los datos generales de los estudiantes de cuatro instituciones educativas (IE) ubicadas en diferentes zonas del departamento de Boyacá: Institución Educativa José María Silva Salazar (IEJMSS), Institución Educativa Técnica Industrial Gustavo Jiménez (IETIGJ), Institución Educativa Valentín García (IEVG) y el Colegio de la Presentación (COLPRE). En este mismo instrumento, las preguntas fueron orientadas a evidenciar cómo perciben los estudiantes su resolución de problemas y las dificultades en la interpretación de ecuaciones químicas basadas en el trabajo de Martínez, M. y De Longhi, A. [4]. Este test diagnóstico se elaboró y aplicó empleando Google Forms.

FASE 2. Diseño de la estrategia didáctica basada en los niveles de caracterización. De acuerdo al diagnóstico, se elaboró una estrategia didáctica para facilitar la resolución de problemas estequiométricos, mediada por la intervención del videojuego “Mol2All” como herramienta de apoyo.

FASE 3. Identificación de requisitos del videojuego. Se tuvieron en cuenta dos aspectos: el perfil del jugador, el cual se determinó mediante la metodología de Bartle; y el segundo, la determinación de la accesibilidad y usabilidad para las condiciones técnicas que se acomoden a la población.

3. RESULTADOS

FASE 1. Caracterización del nivel de interpretación de ecuaciones químicas por parte de los estudiantes

En la Tabla 1, se recopila la información obtenida al caracterizar cuatro muestras, de diferentes instituciones educativas (IE): Institución Educativa José María Silva Salazar (IEJMSS), Institución Educativa Técnica Industrial Gustavo Jiménez (IETIGJ), Institución Educativa Valentín García (IEVG) y el Colegio de la Presentación (COLPRE),

permitiendo establecer similitudes y diferencias entre los estudiantes pertenecientes a estos establecimientos.

Tabla 1. Caracterización de las muestras analizadas.

	IEJMSS	IETIGJ	IEVG	COLPRE
Oficial/Privado	Oficial	Oficial	Oficial	Privado
Municipio en el que se ubica	Buenavista (occidente)	Sogamoso (Centro oriente)	Labranzagrande (oriente)	Tunja (Centro)
Tamaño de muestra	14 estudiantes	14 estudiantes	14 estudiantes	14 estudiantes
Zona de residencia	Rural (80%)	Urbana (71,4%)	Urbana (81%)	Urbana (90%)
Estrato socioeconómico	1 y 2	1 y 2	1 y 2	4
Edad	16 años o más (80%)	16 años o más (100%)	16 años o más (94%)	15 años (62%)
Género	Masculino (55%)	Masculino (57%)	Femenino (62%)	Femenino (86%)
Nivel de interpretación de ecuaciones químicas	2,7	3,5	2,5	2,8
Autoevaluación Resolución de Problemas	3	3	3,3	3,5

Los valores asignados para los ítems de “Nivel de interpretación de ecuaciones químicas” y “Autoevaluación Resolución de Problemas”, están en una escala de 0 a 5, siendo 0 el valor más bajo y 5 el más alto. En la Tabla 1, se especifica el valor promedio que tuvieron las muestras en cada uno de los aspectos ya mencionados.

En cuanto al nivel de interpretación de ecuaciones químicas que manejan los estudiantes de las IE estudiadas, se observaron algunas diferencias. Por tal razón, se hizo necesario realizar el análisis comparativo por medio de una prueba T-Student para muestras independientes, empleando la herramienta JASP 0.14.1. Las hipótesis que se pusieron a prueba se basaron en la existencia o no de una diferencia significativa entre las medias del nivel de interpretación de ecuaciones químicas de cada IE. La tabla 2, ilustra mejor estos hallazgos.

Tabla 2. Datos Prueba T-Student para muestras independientes.

Comparación	t	df	p	d de Cohen	Test de normalidad	Igualdad de varianzas
IEJMSS vs. IETIGJ	1,918	26	0,066	0,725	0,369 y 0,339 respectivamente	p=0,572
IEJMSS vs. IEVG	0,421	26	0,677	0,159	0,369 y 0,083 respectivamente	p=0,858
IEJMSS vs. COLPRE	0,299	26	0,767	0,113	0,369 y 0,214 respectivamente	p=0,924

A partir de lo anterior, resultados obtenidos y organizados en la Tabla 2, puede concluirse lo siguiente:

Para el valor de t: las medias de las IE en el nivel de interpretación de ecuaciones químicas no difieren de manera significativa. Para el caso de la comparación entre las muestras IEJMSS y IETIGJ, aunque el valor de t alcanza un valor cercano a 2 (1,918), no es suficiente para inferir que exista una diferencia marcada entre las medias.

El valor de significancia (valor de p): para las tres comparaciones, el valor alcanzado por p es mayor a 0,05. Lo cual indica que NO hay una diferencia significativa entre las medias de las IE en cuanto al nivel de interpretación de ecuaciones químicas.

d de Cohen: la comparación entre las muestras IEJMSS y IETIGJ muestra una d igual a 0,725, que demuestra que la diferencia entre las medias está en un nivel medio. En los otros dos casos muestra que la diferencia entre las medias es baja, es decir, tienden a ser similares.

Test de normalidad: los valores tabulados son mayores a 0,05, indicando que la distribución de los datos en las tres comparaciones es uniforme.

Igualdad de varianzas: el valor que alcanzó p en cada caso es mayor a 0,05, lo que se traduce en que existe una igualdad entre las varianzas de las muestras analizadas en las tres comparaciones.

FASE 2. Diseño de la estrategia didáctica basada en los niveles de caracterización

De acuerdo a lo obtenido en la fase 1 de caracterización, en la cual no se encontró diferencia significativa entre los niveles de interpretación de ecuaciones químicas de los cuatro establecimientos educativos analizados, se determinó cuáles son las herramientas que a los estudiantes les son más útiles para resolver con éxito un problema en general:

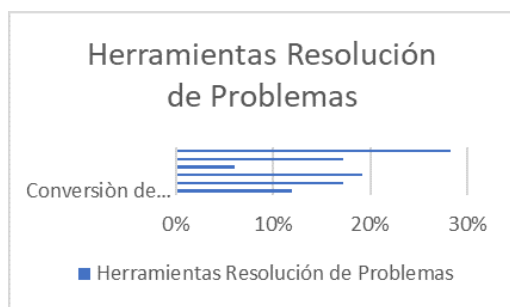


Figura 1. Herramientas empleadas por los estudiantes para la Resolución de Problemas.

Como se observa en la gráfica global, no hay una herramienta que tenga una aceptación del 50% o más. Las más significativas fueron las siguientes: revisar un ejercicio resuelto paso por paso (28,3%), establecer la razón molar (19,2%) y pedir explicación del docente (17,2%). Con estas herramientas se elaboraron dos Guías de Aprendizaje, recopilando información de algunos sitios Web y libros de texto especializados, para aplicar en los estudiantes en el modelo de Educación en Casa.

En cuanto a la herramienta “Balance de ecuación”, la cual tuvo una aceptación del 17,2% global de las muestras analizadas, reafirma el bajo nivel de interpretación de ecuaciones químicas que tienen los estudiantes objeto de estudio.

FASE 3. Identificación de requisitos del videojuego

Se adaptó el test de Bartle, de acuerdo a las condiciones de la población y éste se aplicó los estudiantes de la IEJMSS para determinar el perfil de jugador de cada uno de ellos. El test arrojó la siguiente información:

Tabla 3. Perfil del jugador según Bartle (2005), Adaptado de Vargas et al. (2019)

Perfil jugador	Características	Aspectos que llaman su atención	Perfil jugador en la muestra
Competitivo	-Busca ser el ganador y primero en la tabla de clasificación. -Quiere ganar a toda costa. -Le atrae la popularidad	-Tabla de clasificación -Ranking -Avance en los niveles	7,1%

Logrador	-Busca una recompensa por lo que resuelve retos con agilidad. -Explora nuevos niveles y escenarios. -Busca la satisfacción personal.	Superación de retos/logros	14,3%
Socializador	-El juego lo emplean para forjar nuevas amistades -Les gusta generar acciones grupales para que todos puedan superar los niveles. -Olvidan sus propias estrategias por socializar.	-Chats de usuarios -Feedback en cada nivel	21,4%
Explorador	-Siempre está en la autosuperación. -Se siente atraído por encontrar características ocultas del juego.	-Diferentes niveles -Retos/Logros	57,2%

De acuerdo a estos datos se dedujo que el videojuego requería tener algo de todos los aspectos que llaman la atención a los diferentes perfiles de jugadores y así, que este instrumento pueda ser usado en diferentes contextos educativos, no sólo en el analizado en este estudio.

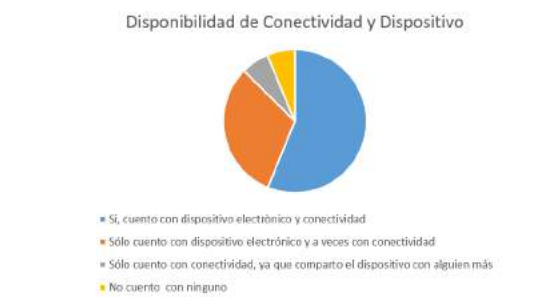


Figura 2. Estudiantes con acceso a conectividad y dispositivo electrónico

La Figura 2 muestra la disponibilidad de conectividad, así como de algún dispositivo electrónico (móvil, Tablet o computador) en los estudiantes de la IEJMSS, con el fin de evaluar, además de los aspectos motivantes para cada perfil de jugador, las características como software que debía tener “Mol2All”. Se observa que el 56% de la muestra analizada tiene acceso a conectividad y algún dispositivo electrónico, mientras que el 31,3% afirma que

posee el dispositivo, pero tiene inconvenientes con la conectividad. Con este 87.3% de la población en cuestión, se tomó la decisión del que el videojuego "Mol2All" fuera liviano, no generara el consumo importante de datos y sea responsivo para poder interactuar con éste, bien sea desde un dispositivo móvil, Tablet o computador, a través de un browser.

4. CONCLUSIONES

Con respecto al análisis diagnóstico elaborado a las cuatro muestras de las cuatro diferentes IE evaluadas, pudo determinarse que la mayoría de los estudiantes de educación media, independiente de su zona de residencia, su estrato socioeconómico, si la Institución Educativa es de carácter oficial o privado, presentan deficiencias en la interpretación de las ecuaciones químicas. Todo ello coincide con la premisa de que una de las causas de las deficiencias de la resolución de los problemas radica en la poca apropiación de los conceptos previos, como es el interpretar una ecuación química y reconocer si está balanceada [4].

No existe consenso dentro de los estudiantes de cuál es la mejor herramienta para comprender la forma de realizar los cálculos químicos, sin embargo, el factor motivacional puede ayudar para que se incremente el interés; por este motivo, se estableció que una estrategia didáctica mediada por un videojuego como Mol2All se puede llegar a desarrollar en los estudiantes sus habilidades cognitivas relativas a la resolución de problemas [10] y [11].

El esquema del videojuego Mol2All se deberá estructurar a través de la estrategia didáctica, producto de la recopilación de información y la generación propia de problemas estequiométricos ambientados en la situación actual de pandemia a causa del SARS-CoV-2. Esto con el fin de generar un aprendizaje significativo, puesto que es contexto cotidiano en el que el estudiante asume un papel activo [1], [8] y [9].

El videojuego Mol2All se diseñará para promover las habilidades cognitivas y las relacionadas con la solución

de problemas, basado en aspectos que se acerquen a la realidad del estudiante y se ajuste a sus preferencias y necesidades formativas [13]. La recolección de información sobre la disponibilidad en conectividad y dispositivo electrónico, así como determinar el perfil de jugador de nuestros estudiantes (metodología de Richard Bartle), permitirá direccionar el diseño de Mol2All para que cumpla con la mayoría de las expectativas de la muestra analizada, además de alcanzar su objetivo no sólo de entretenimiento, sino también de potenciación de habilidades relativas a la resolución de problemas [15].

REFERENCIAS

- [1] S. M. Obando, Implementación de estrategias didácticas para la enseñanza de la estequiometría en estudiantes del grado once de enseñanza media, Medellín: Repositorio Universidad Nacional, 2013.
- [2] «Estequiometría y ley de conservación de la masa: lo que puede ocultar la simplificación del discurso experto,» *Ciênc. Educ.*, Bauru, vol. 21, nº 2, pp. 351-360, 2015.
- [3] C. D. Bridges, *Experiences Teaching Stoichiometry to Students in Grades 10 and 11*, Washington D.C.: Walden Dissertations and Doctoral Studies Collection, 2015, p. 145.
- [4] M. S. Martínez y A. L. De Longhi, «Identificación y categorización de dificultades de lectocomprensión en enunciados de lápiz y papel de estequiometría,» *Revista Eureka de Enseñanza y divulgación de las ciencias*, vol. 10, nº 2, pp. 159-170, 2013.
- [5] G. E. Hurtado, «Las estrategias didácticas activas en el aprendizaje de la resolución de problemas de química, influencia del estilo cognitivo del estudiante,» *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, vol. 39, nº 1, pp. 31-51, 2016.
- [6] M. O. Castelán y G. Hernández, *Estrategia didáctica para apoyar la comprensión de la estequiometría a partir del uso de analogías*, Veracruz: X Congreso nacional de investigación educativa COMIE, 2009.
- [7] A. Raviolo y G. Lerzo, «Enseñanza de la estequiometría: uso de analogías y comprensión

- conceptual,» Educación Química, vol. 27, nº 1, pp. 195-204, 2016.
- [8] A. Raviolo y G. Lerzo, «Analogías en la enseñanza de la estequiometría: revisión de páginas web,» Revista electrónica de investigación en educación en ciencias, vol. 9, nº 2, pp. 28-41, 2014.
- [9] D. A. Mojica, Ambiente de aprendizaje virtual como apoyo para la enseñanza de estequiometría en grado décimo, Bogotá: Repositorio Universidad Nacional, 2013.
- [10] K. Marcano, «Aplicación de un juego didáctico como estrategia pedagógica para la enseñanza de la estequiometría,» Revista de Investigación No.84, vol. 39, nº 1, pp. 181-204, 2015.
- [11] L. Abella y Á. García, «El uso de videojuegos para la enseñanza de las ciencias, nuevos desafíos al papel docente,» EDUCyT, vol. 84, nº 2, pp. 19-32, 2014.
- [12] F. Quintanal, «Aplicación de minijuegos en física y química de bachillerato,» Historia y Comunicación Social, vol. 18, nº No. Especial Octubre, pp. 411-420, 2013.
- [13] A. P. Roncancio, M. F. Ortiz, H. Llano, M. J. Malpica y J. J. Bocanegra, «El uso de los videojuegos como herramienta didáctica para mejorar la enseñanza-aprendizaje: una revisión del estado del tema,» Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, vol. 17, nº 2, pp. 36-46, 2017.
- [14] R. Hernández Sampieri, C. Fernández y P. Baptista, Metodología de la investigación, Quinta Edición, México D.F.: Mc Graw Hill, 2010.
- [15] Z. Vargas, A. Rodríguez y M. Mendoza, «Modelo de integración de gamificación como estrategia de aprendizaje para colegios virtuales. Caso: Sogamoso-Colombia,» Espacios, vol. 40, nº 12, pp. 12-26, 2019.
- [16] A. Raviolo, «Simulando estequiometría con la hoja de cálculo: uso de la barra de desplazamiento,» Journal of Science Education, vol. 18, nº 1, pp. 30-34, 2017.

MODELAMIENTO TERMOCINEMÁTICO 3D DE LA HISTORIA DE EXHUMACIÓN DEL SECTOR DE GUAYABETAL, KM 58 VÍA BOGOTÁ – VILLAVICENCIO: RELACIONES ENTRE CLIMA, RELIEVE Y TECTÓNICA

3D thermokinematic modeling of the exhumation history of the Guayabetal sector, km 58 vía Bogotá– Villavicencio: relationships between climate, relief and tectonics

Daniel R. Hernández Chaparro¹, Mauricio A. Bermúdez², Greg Hoke³, Helbert García Delgado⁴, Silvia Machuca⁵

¹Universidad de Sao Paulo (USP), Instituto de Geociencias (IGC), ²Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, ³Department of Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse, NY, USA,

⁴Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia, ⁵Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Email: ¹daniel.hernandez04@uptc.edu.co, ²mauricio.bermudez@uptc.edu.co, ³gdhoke.syr.edu,

⁴helbertgarcia@gmail.com ⁵silviamachuca01@gmail.com

(Recibido el 11 de diciembre de 2020 - Aceptado el 8 de abril de 2021)

Resumen

Las interacciones -clima-tectónica pueden dar lugar a cambios topográficos significativos tanto por aumentos en la elevación como por el incremento de pendientes. Estos cambios, en conjunción con la acción de la gravedad suscitan a su vez diferencias en la energía potencial de materiales geológicos (rocas, agua, etc.) desencadenando procesos geomórficos importantes tales como la erosión por agua, tanto laminar como concentrada, y los movimientos en masa. En la vía Bogotá-Villavicencio en el kilómetro 58 del municipio de Guayabetal, se han presentado numerosos fenómenos de remoción en masa. La presente investigación explora como operan las interacciones entre el clima y la tectónica como procesos controladores del relieve actual a corto y largo plazo sobre la zona de estudio. Con esta finalidad se compilaron edades termocronológicas existentes en la zona, y se generó un modelo directo termocinémático 3D para estimar los pulsos y las tasas de exhumación. Los resultados de este último sugieren 3 pulsos de exhumación: el primero entre 40 Ma- 25 Ma a una tasa de exhumación de 0,5 km/Ma, seguido de un pulso entre 25 Ma- 15 Ma con una tasa de 0,1 km/Ma, y finalmente, desde 15 Ma al presente tasas de ~2 km/Ma. Adicionalmente, datos de precipitación fueron utilizados para estimar atributos primarios y secundarios del terreno, mientras que los datos de sismicidad instrumental fueron empleados para calcular la deformación sísmica, energía sísmica y levantamiento vertical por deformación sísmica. Las distintas variables fueron comparadas estadísticamente. Se concluye que el paisaje actual de la zona no es afectado uniformemente por la tectónica y las precipitaciones. En el noroccidente del área existen bajas tasas de erosión y actividad tectónica, así la evolución del paisaje es más pasiva, y el relieve es controlado por el patrón de precipitaciones. En contraste, hacia el suroriente específicamente entre macizo de Quetame y el piedemonte llanero, el relieve es controlado por la tectónica presente en el área. El efecto antrópico con las modificaciones al paisaje introducidas por la creación de una vía nacional, aunque es importante no fue analizado en la presente investigación.

Palabras clave: termocronología, modelamiento numérico, evolución del paisaje, Cordillera Oriental de Colombia, estabilidad de taludes, remoción en masa, geomorfometría.

Abstract

Climate-tectonic interactions can result in significant topographic changes due to both elevation and slope increases. These changes, in conjunction with the action of gravity, in turn, cause differences in the potential energy of geological materials

triggering important geomorphic processes such as erosion by water, both laminar and concentrated, and mass movements. On the Bogotá-Villavicencio road at kilometer 58 in the municipality of Guayabetal, numerous mass removal phenomena have occurred. This research explores how the interactions between climate and tectonics operate as controlling processes of the current short- and long-term relief over the study area. Based on this purpose, existing thermochronological ages in the area were compiled, and a direct 3D thermokinematic model was generated to estimate pulses and exhumation rates. The results of the latter suggest 3 exhumation pulses: the first one between 40 Ma- 25 Ma at an exhumation rate of 0.5 km/Ma, followed by a pulse between 25 Ma- 15 Ma with a rate of 0.1 km/Ma, and finally, from 15 Ma to the present rates of ~ 2 km/Ma. Additionally, precipitation data was used to estimate primary and secondary soil attributes, while instrumental seismicity data was used to calculate seismic deformation, seismic energy and vertical seismic deformation survey. The different variables were compared statistically. It is concluded that the current landscape of the area is not uniformly affected by tectonics and rainfall. In the northwest of the area there are low rates of erosion and tectonic activity, so the evolution of the landscape is more passive, and the relief is controlled by the pattern of precipitation. In contrast, to the southeast, specifically between the Quetame massif and the piedmont plains, the relief is controlled by the tectonics present in the area. The anthropic effect with the modifications to the landscape introduced by the creation of a national road, although it is important, it was not analyzed in this research.

Key words: *thermochronology, thermal-kinematic modelling, landscape evolution, Eastern Cordillera of Colombia, slope stability, mass- wasting processes, geomorphometry.*

1. INTRODUCCIÓN

En virtud de que posibles interacciones entre procesos climáticos y tectónicos como fenómenos de remoción en masa que ocurren en espacios con asentamientos de ciudades, pueblos y caseríos, podrían ocasionar daños materiales y pérdidas humanas, el estudio de zonas tectónicamente activas, y en particular del sistema montañoso andino, adquiere relevancia desde la perspectiva de la ingeniería geológica o geología aplicada debido a la complejidad geológica de este sistema.

La presente investigación explora la forma que operan las interacciones entre el patrón de precipitaciones actuales y la tectónica como procesos controladores del relieve actual a corto y largo plazo, integrando los distintos factores mostrados en la Figura 1. El área de estudio se encuentra en los alrededores del km 58 de la vía Bogotá-Villavicencio (ver triángulo rojo en la Figura 2), Cordillera Oriental de Colombia, tomando como base el modelamiento numérico de datos termocronológicos existentes, en particular edades de trazas de fisión en apatitos (por sus siglas en inglés: *Apatite Fission-Track*, AFT) y trazas de fisión en circon (por sus siglas en inglés: }

Zircon Fission-Track, ZFT), parámetros geomorfométricos, datos sismológicos y litología. Para ello se siguió la metodología propuesta por Bermúdez et al. [1, 2, 3], quienes combinaron datos geológicos recolectados en campo con métodos de termocronología cuantitativa [4, 5, 6], con lo que se desarrolló el modelado de la historia de exhumación de al menos 35 superficies de erosión del altiplano antioqueño en Colombia, discriminando en cada una de esas superficies los posibles controles tectónicos, climáticos o la interacción de ambos como agentes rejuvenecedores del paisaje actual, lo cual constituyó la primera aplicación del software PECUBE® en Colombia.

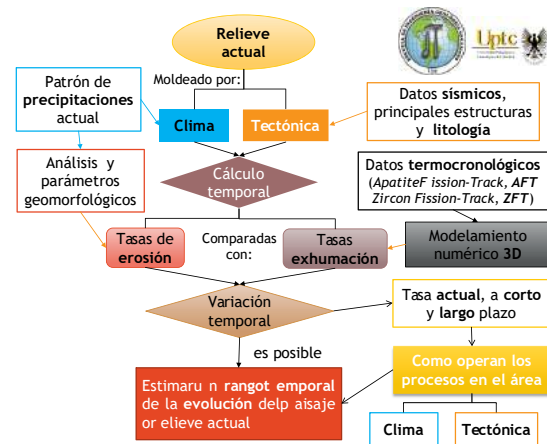


Figura 1. Esquema de los componentes para el análisis del relieve actual.

1.1. Localización

Se observa en la Figura 2, el Valle del Río Negro (también llamado Río Guayuriba), caracterizado por la presencia de un valle ancho con relieve ondulado de clima frío, con topografía más abrupta hacia el S en los dominios del Macizo de Quetame, este valle muy densamente poblado incluye en sus laderas a las poblaciones de Ubaque, Fómeque, Cáqueza, Quetame y Fosca; al W de este valle a están los municipios de Une y Chipaque, al oriente en el cañón del Río Guatiquia los municipios de San Juanito y El Calvario. El Río Negro continua hacia el S hasta Guayabetal, donde se ubica el deslizamiento del Km 58, objeto de esta investigación, luego del municipio el Río Negro se une con el Río Blanco cambiando su nombre a Río Guayuriba; el valle del Río Blanco marca una franja al S del área de estudio, además se encuentran poblaciones del departamento del Meta como Acacias y Villavicencio.

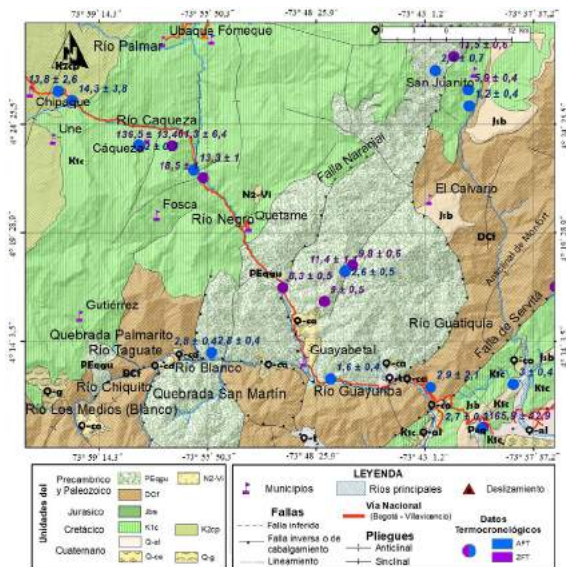


Figura 2. Mapa geológico [7] que comprende la vía Bogotá-Villavicencio y distribución de edades termocronológicas existentes [8, 9], se denota sobre este mapa en triángulo rojo la zona de deslizamientos del km-58, los puntos azules y morados corresponden con la ubicación de muestras previamente fechadas por los métodos de trazas de fisión en apatitos (AFT) y circones (ZFT), respectivamente.

1.2. Antecedentes

Históricamente, la autopista al Llano ha sido escenario de múltiples accidentes automovilísticos y derrumbes, debido a las difíciles condiciones topográficas de la Cordillera Oriental, y también a errores de ingeniería. El más recordado de estos sucesos es conocido como la tragedia de Quebrada Blanca ocurrida el 28 de junio de 1974 que dejó un número significativo de personas fallecidas.

El trazado de la vía comienza justo después de salir de Bogotá, se encuentra el túnel Argelino Durán Quintero, también conocido como túnel del Boquerón, de 2,2 km de longitud, en cuya salida se ubica el peaje de Boquerón. Tras esto, se encuentran el municipio de Chipaque, y los accesos a Une y Cáqueza. Poco antes de llegar a Quetame, la vía toma un trayecto paralelo al Río Negro a lo largo del valle del mismo, lo que la hace susceptible a verse afectada por derrumbes de tierra. Entre Quetame y Guayabetal, se encuentran el peaje de Naranjal y el túnel de Quebrada Blanca, construido tras la tragedia ocurrida en 1974. Después de Guayabetal se encuentran los sectores de Chirajara y Pipiral.

1.1.1. Deslizamiento del km 58, Bogotá – Villavicencio. Se presenta el cierre exactamente entre los kilómetros 57 y 58,5 en la zona denominada de Mesa Grande el 14 de junio del 2019, que conllevaron al derrumbe de más de 600.000 m³ de material no consolidado, de los cuales 225.000 m³ generaron la obstaculización total de la vía (Figura 3), cerca de la población de Guayabetal (Cundinamarca) siendo ésta la más afectada, lo que conllevó al Ministerio del Transporte tomar una medida de suspensión de transitabilidad de forma indefinida.

Este fenómeno de remoción en masa en una terraza coluvio-aluvial colgada sobre filitas (PEqgu; Figura 2); corresponde a un deslizamiento de tipo complejo traslacional con reactivación latente de flujo de detritos y desprendimiento de talud activado por las altas precipitaciones de la época de lluvias.



Figura 3. Derrumbe en vía Bogotá-Villavicencio; (Fuente: Captura video Noticias Caracol).

2. MARCO GEOLÓGICO

La Cordillera Oriental de Colombia es la tercera y la más joven de las tres cordilleras andinas en Colombia, siendo ésta la última en exhumarse como resultado de una interacción compleja entre las placas Caribe, Nazca-Cocos, Suramérica y acreciones de bloques [10]. Según Mora [11], al igual que muchos otros autores, esta cordillera corresponde a un orógeno que se invirtió durante una fase compresiva cenozoica, valiéndose de estructuras reactivadas de edad mesozoicas producidas durante una fase de rift. Entre esas importantes estructuras reactivadas que hoy en día producen la carga tectónica y el acortamiento de la montaña, están las fallas Servitá, San Juanito y Naranjal, situadas en el flanco oriental del orógeno (Figura 2 y 4).

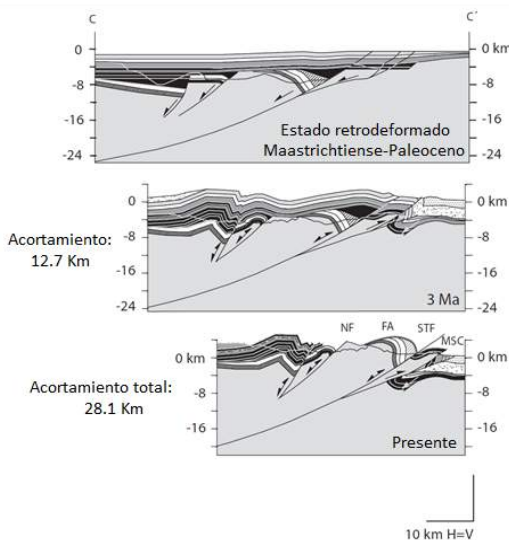


Figura 4. Perfil de la sección C-C', Reconstrucción de

historia estructural de la retrodeformación basada en datos termocronológicos, reflectancia de vitrinita Ro, datos sísmicos y de paleoaltimetría (paleoflora). Abreviaciones: NF—Falla de Naranjal; FA— anticlinal de Farallones; MSC— Falla de Mirador; STF—Falla de Servitá (Modificado de [8])

La falla de Naranjal se generó durante el Mesozoico por tectónica extensional y durante el Neógeno sufrió una reactivación, cambiando el mecanismo de falla normal a inversa. (ver Figura 16, Perfil de Río Guayuriba [11]), hoy en día presenta una expresión moderada localizada en el flanco oriental de la Cordillera Oriental entre las latitudes 3,6 y 4,5°N (Figura 4), esta falla yace en el bloque colgante de la Falla de Servitá, la cual es muy activa. A la Falla de Naranjal se le han asociado los destructores sísmicos de Quetame del 2008 (evento de magnitud 5.7 y profundidad de 300 m ocurrido el 24 de mayo del 2008) y Fómeque de 1743 (evento ocurrido el 18 de octubre de 1743 de magnitud macrosísmica igual a 6.30 ± 0.35 calculada aplicando la metodología de Bakun y Wentworth [12] y la relación de atenuación de la intensidad macrosísmica [13]).

Cabe resaltar la cercanía de la falla activa de Naranjal con el deslizamiento del km 58 es un deslizamiento complejo sobre una terraza alta disectada de un depósito aluvial reciente (Q-ca en Figura 2) de sobre unas filitas fracturadas al costado oriental del Río Negro (Río Guayuriba), a lo largo de este último son comunes los depósitos aluviales, formados principalmente a lo largo de los cauces de los ríos, los cuales son el resultado de la acumulación de sedimentos gruesos a muy gruesos en las zonas de menor energía, conformando terrazas angostas y alargadas, compuestas esencialmente de gravas, guijos y cantos en una matriz areno-lodosa no consolidada, los cuales son producto, además, de la tectónica activa en las fallas de piedemonte que acentúan los procesos de erosión y sedimentación hacia las zonas bajas, sobre todo en la época invernal.

Este depósito aluvial reciente (Q-ca) con baja consolidación amplifica la onda sísmica liberada por la falla de Naranjal al

transferir energía sísmica de eventos sísmicos superiores a 4 en la escala de Richter, posiblemente, influenciando de manera directa o indirecta un fenómeno de remoción en masa siendo la amenaza sísmica el factor detonante o condicionante debido al alto potencial sismogénico de esta falla.

En el centro del área de estudio afloran rocas metamórficas, metasedimentarias como el Grupo Esquistos de Quetame (Pq) y su formación Filitas y Cuarzitas de Guayabetal (PEqgu) y sedimentarias del Precámbrico y Paleozoico refiriéndose al Grupo Farallones (DCf) aflorante en gran proporción en el S-E del área de estudio; las cuales se presentan discordantes entre sí y constituyen el basamento del área. De igual forma, reposan discordantemente las unidades del Jurásico Superior como la Formación Brechas de Buenavista (Jsb) y del Cretácico inferior como el grupo Cáqueza (K1c) y la formación Chipaque (K2cp) aflorantes en la zona N-W del área de estudio; los sedimentos cuaternarios no consolidados están constituidos por varios niveles de terrazas, conos o abanicos aluviales, depósitos de ladera o coluviones y sedimentos aluviales recientes. (INGEOMINAS, 2011).

Se presenta el flanco oriental del Sinclinal de Teusacá y en el centro del área de estudio el Anticlinal de Potrero Grande desde el municipio de Fomeque (Figura 5) hasta Quetame en donde se ve cortado por la Falla de Quetame, siendo las principales estructuras además de la Falla de San Juanito la cual separa un bloque occidental cuyo basamento Infra-Cretácico lo constituye el Grupo Quetame, del bloque oriental, unidad infrayacente al Cretácico basal es la Formación Capas Rojas del Valle de Guatiquía de Paleozoico Superior [4].

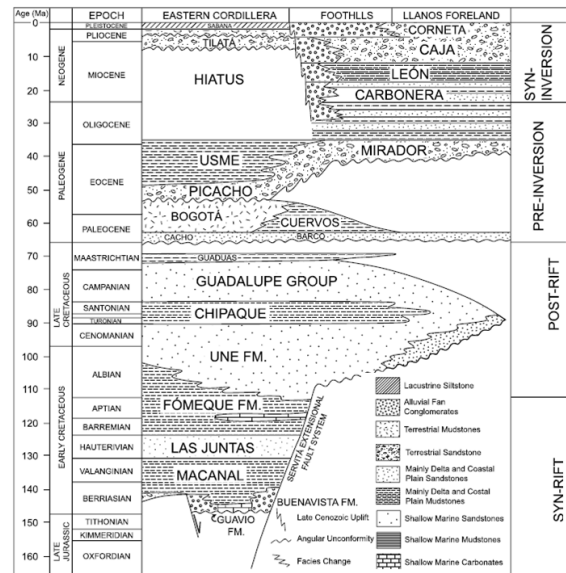


Figura 5. Estratigrafía meso-cenozoica del flanco oriental de la Cordillera Oriental (Río Guayuriba – Guatiquía) Tomada de: Mora et al., 2006.

3. BASES DE DATOS Y MÉTODOS

En la Figura 6, se muestran en los cuadros rellenos de color las bases de datos utilizadas en la presente investigación, mientras en los cuadros blancos se presenta la referencia de extracción de los datos.

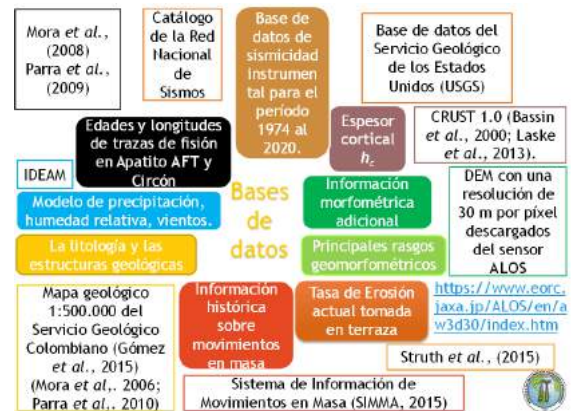


Figura 6. Bases de datos usada en esta investigación.

Las unidades litológicas de las cuales se tienen datos termocronológicos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales Unidades Litológicas aflorantes en el área de estudio [14, 15, 16, 17, 18].

Símbolo	Grupos y unidades	Descripción litológica	Edad
K2cp	Formación Chipaque	Shales, calizas, fosforitas, cherts y cuarzoarenitas. Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur.	Cenomaniano-Maastrichtiano
K1c	Formación Fomeque	Alternancia de conjuntos de lutitas negras y conjuntos de calizas y areniscas calcáreas	Berriasiano-Cenomaniano
	Grupo Cáqueza	Arcillolitas y limolitas negras con intercalaciones menores de arenitas y calizas. Segmentos de cuarzoarenitas de grano fino a grueso y conglomerados.	
Jsb	Formación Brechas de Buenavista	Conglomerados y brechas; arenitas de grano fino a conglomeráticas y calizas estromatolíticas, e intercalaciones de lodolitas negras.	Titoniano
DCf	Grupo Farallones	Cuarzoarenitas, arcillolitas, lodolitas grises y, ocasionalmente, calizas y conglomerados.	Devónico-Carbonífero
PEqgu	Filitas y Cuarzitas de Guayabeta	Filitas verdosas y cuarzitas	Ordovícico-Llandovery

3.1. Bases de datos termocronológicas

En estas formaciones fueron tomados 25 datos termocronológicos de edades AFT y ZFT [8, 9], los cuales fueron usados en este trabajo para la modelización numérica (Tabla 2).

Adicionalmente, se compilaron 7 edades y tasas de incisión fluvial mediante isótopos cosmogénicos (Berilio-10) realizadas en terrazas del Río Guayuriba [19], los cuales fueron interpolados a lo largo de la zona de estudio usando el método IDW de la licencia académica existente en la Universidad de ArcGIS®.

Tabla 2. Edades termocronológicas existentes en la zona de estudio: Edades por trazas de fisión en apatito (AFT) y circón (ZFT) [8, 9]. En la Figura 1, se ubica cada muestra por su código en el área de estudio.

Código	Latitud	Longitud	Unidad o Grupo	AFT	error AFT	ZFT	error ZFT
BV-MP3-F	44.427	-740.207		13,8	2,6	N/A	0
BV-MP7-F	44.349	-738.003	F. Chipaque	14,3	3,8	N/A	0
SJ-2a	44.304	-740.094		1,2	0,4	N/A	0
BV 120-F	43.979	-736.802		2	0,7	N/A	0
BV-151	43.705	-739.543		3,8	0,7	18,5	1
BV126	43.772	-739.008	G. Cáqueza	N/A	0	13,3	1
BV-65	43.970	-739.087		N/A	0	61,3	6,4
SJ-1	44.438	-739.266		N/A	0	5,9	0,4
BV-121	43.968	-736.809		N/A	0	136,5	13,4
BV-427	41.986	-739.533	Formación Brechas de Buenavista	3,0	0,4	N/A	0
WPT	41.962	-736.438	G. Farallones	2,9	2,1	N/A	0
BV-283	42.796	-737.124		N/A	0	145,2	17,3
BV-192	42.674	-736.091		2,3	0,6	9	0,5
BV-195	42.933	-738.003		2,6	0,5	N/A	0
BV-196	42.925	-737.828		2,6	1,1	11,4	1,1
BV-277	41.614	-737.834		2,7	0,3	N/A	0
BV-279	41.624	-736.702		2,6	0,3	165,9	12,9
FT-1	44.889	-736.690		N/A	0	13,1	0,9
SJ-5	44.716	-737.312		N/A	0	11,5	0,6
BV-423	42.029	-736.931	Filitas y Cuarzitas de Guayabeta	1,6	0,4	N/A	0
BV-90	42.245	-737.951		2,8	0,4	N/A	0
BV-86	42.789	-738.941		N/A	0	8,3	0,5
BV-194	42.976	-738.346		N/A	0	9,8	0,6
BV-90	42.251	-737.771		2,8	0,4	N/A	0
FT-6	44.599	-738.938		2,4	0,7	N/A	0

3.1.1. Índice de erosión a largo plazo. Las distribuciones de las edades termocronológicas correspondientes a edades AFT y ZFT se utilizaron para calcular las tasas de exhumación o de erosión a largo plazo, asumiendo que la cantidad de erosión es igual al levantamiento, esto equivale a decir que la topografía se encuentra en estado de equilibrio [20]. Con este propósito se empleó

la rutina Age2Edot desarrollada por Brandon [21]. Los parámetros de entrada de esta rutina son: 1) el tipo de mineral fechado (apatito o circón), 2) el método utilizado (trazas de fisión), 3) la difusividad termal, habiendo en este caso usado $25 \text{ km}^2\text{My}^{-1}$, 4) el espesor del modelo de 40 km basado en el espesor cortical promedio del modelo CRUST1.0 [22, 23] usado, y 5) una temperatura en la base del modelo fija de $400 \text{ }^\circ\text{C}$, al igual que la considerada para los modelos termocinématicos. Esto permitió convertir cada edad termocronológica en una tasa de erosión que es comparada con los otros métodos.

3.1.2. Modelamiento termocinémático tridimensional.

Con el fin de establecer la historia de exhumación de este sector de la Cordillera Oriental, se utilizaron datos termocronológicos AFT y ZFT existentes (Tabla 2) [11, 9], se utilizó el DEM, y los parámetros resumidos en la Tabla 2. Todos estos fueron incorporados al código termocinémático 3D PECUBE en su versión directa (“forward”) desarrollado por Braun [4, 5, 6] el cual permite integrar distintos parámetros termales, flexurales, topográficos y estructurales (orientaciones y geometrías de fallas). El código resuelve la ecuación del calor en tres dimensiones, permitiendo predecir edades termocronológicas para distintos sistemas, y elevaciones. De estas predicciones, fue posible generar perfiles edad-elevación sintéticos, estimar tasas de erosión a largo plazo; además de estudiar la influencia de zonas de fallas en la región analizada.

Los parámetros texturales y flexurales restringen la respuesta termal del área modelada a cambios de exhumación y relieve. La historia termal de puntos en la superficie se usa para predecir las edades de AFT y ZFT tomando en cuenta la temperatura de control sobre el desvanecimiento de las huellas “annealing track” [24].

Se realizó un total de 10000 modelos directos “forward” asumiendo tres y cuatro fases de exhumación. Se asume el periodo inicial del modelo y algunos parámetros flexurales y termales fijos como datos de entrada del código, los cuales son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de entrada fijos, las filas sin color de relleno se refieren a los parámetros flexurales, mientras que aquellas de color gris corresponden con las variables termales.

Parámetro	Valor	Referencias
Tiempo inicial del modelo	40 (Ma)	
Densidad de la corteza	2700 (kg/m ³)	[25]
Densidad de la astenosfera	3200 (kg/m ³)	[25]
Módulo de Young	1.d11	[25]
Coefficiente de Poisson	0,25	[25]
Espesor del modelo	40 (km)	[22, 23]
Difusividad termal	25 (km ² /Ma)	[26]
Temperatura en la base del modelo	400 (°C)	[1]
Temperatura a nivel del mar	22 (°C)	

Con estos parámetros termales y flexurales de entrada, se restringe la respuesta termal a cambios en la exhumación y relieve (Figura 6), luego se busca la obtención del menor ajuste entre edades observadas y predichas (“misfit”). Por esta razón, se computan diversos modelos forward para abarcar una amplia gama de posibles soluciones en diferentes escenarios, predominantemente, bajo el control de datos estructurales, litológicos y geotermiales existentes en la literatura. La selección del mejor modelo se basa en la minimización del error cuadrático medio o ‘misfit’ en la Ecuación 1.

$$Misfit = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{obs}^i - t_{cal}^i)^2}{error_{obs}^i}} \quad (1)$$

Donde n es el número de observaciones, t_{obs} y t_{cal} corresponde a las edades observadas y predichas por PECUBE para cada una de las muestras i .

3.2. Precipitación

Los registros meteorológicos de precipitación, humedad y viento durante el período 1990- 2019 fueron provistos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). En la Tabla 4, se presentan las estaciones meteorológicas utilizadas y los valores promedios en el intervalo de tiempo antes

mencionado. La precipitación mínima media encontrada fue de 12 mm/mes en la estación de “Casas Las”, mientras la máxima corresponde a 1040,1 mm/mes encontrada en la estación de Buenavista para el mes de junio. Estos valores fueron interpolados en ArcGIS usando el método de distancia inversa ponderada, en el cual se determinan los valores de celda a través de una combinación lineal ponderada de un conjunto de datos de precipitaciones [27], presentando el modelo de precipitaciones anual en la Figura 7. Según el análisis del clima en la cuenca del Río Guayuriba del “POMCA (Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca) Guayuriba” [28]

la dirección predominante del viento en 3 de las estaciones meteorológicas (Monterredondo, Servitá y Susumuco; Tabla 3) en todos los meses es desde el norte y el noreste, si bien en el segundo trimestre del año se tiene una mayor proporción de vientos que corren desde esta dirección. Se destaca también que en el trimestre de junio a agosto se incrementa la proporción de viento que viene desde el oeste y el noroeste; esto puede estar asociado de cierta manera a la temporada de lluvias, pues los eventos de precipitación en el piedemonte pueden generar vientos a escala local, cerca de la superficie.

Tabla 4. Valores promedios mensuales de precipitación del periodo 1990-2019 para algunas estaciones meteorológicas del IDEAM cercanas a la zona de estudio.

Estación	Gutiérrez	Servita	El Calvario	Monfort	Fómeque	Buena-Vista	Monter-Redondo	Susu-Muco	Casas Las	Llano Largo
Código	35020300	35030291	35030010	35030021	35020290	35030091	35020011	35020020	35030080	35025051
X	1008305	1042677	1040794	1047675	1020763	1051029	1028217	1033927	1015662	1005241
Y	962150,4	954960,4	972784,5	968374,3	987874,9	964472,0	962213,0	955770,6	982857,7	987463,9
Altitud	2300,0	191,0	1800,0	1100,0	1900,0	1280,0	1300,0	10,0	2100,0	2980,0
Enero	70,0	393,9	91,0	229,2	38,4	508,6	97,6	217,4	34,0	67,2
Febrero	69,9	109,9	30,0	94,6	16,2	164,5	41,1	81,2	12,0	20,7
Marzo	84,4	132,0	61,0	167,9	29,0	164,7	69,7	86,9	27,1	56,4
Abril	128,1	478,5	161,6	341,3	71,8	533,9	167,0	312,6	67,2	112,2
Mayo	226,6	764,4	292,0	639,6	120,6	898,9	264,7	505,2	133,6	176,5
Junio	316,1	922,6	378,3	927,2	159,1	1040,1	374,2	708,6	129,8	187,5
Julio	358,3	811,5	398,1	768,3	123,3	933,1	354,7	638,9	99,4	203,2
Agosto	259,0	742,7	444,2	726,4	124,9	953,0	414,1	647,3	114,4	209,5
Septiembre	252,1	619,0	360,0	636,2	107,8	688,0	346,0	575,5	84,5	152,1
Octubre	149,0	567,2	271,3	632,2	68,4	636,8	230,5	455,4	72,2	71,1
Noviembre	131,6	598,5	198,8	590,1	100,6	789,5	191,0	326,8	66,6	114,3
Diciembre	132,6	707,1	151,9	404,3	97,8	837,6	132,5	308,1	81,1	140,2
Prec Anual	2177	6847	2839	6157	1058	8149	2683	4864	922	1511
Evapotranspiración	1293	1389	1324	1422	889	1366	1002	1648	753	742
Humedad relativa	84	89	90	90	74	79	80	89	62	61

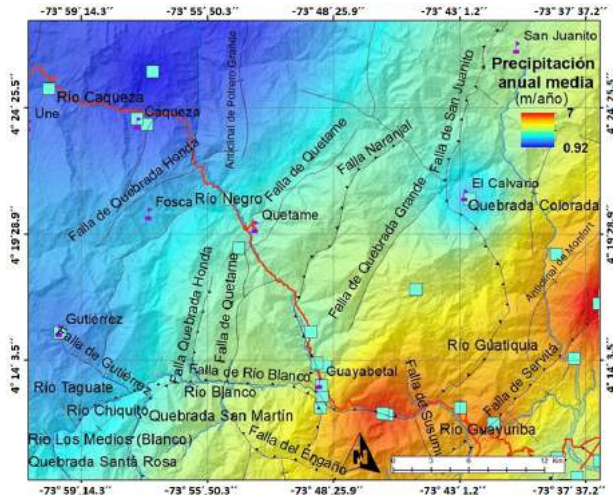


Figura 7. Mapa de precipitaciones promedio (m/año) generado mediante interpolación tipo kriging de ArcGIS a partir de los datos del IDEAM para el periodo 1990 a 2019. En esta figura, los cuadros en azul claro corresponden a las estaciones climáticas de donde se extrajeron los datos, sobre este mismo se han colocado las principales fallas geológicas de las zonas de estudio (Tomadas [7]). La ubicación de las estaciones puede ser detalladas en la Tabla 1, en esta figura el triángulo rojo corresponde al deslizamiento objetivo.

3.3. Sismicidad

A partir de la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) y del catálogo de la Red Sismológica Nacional-RSN- del Servicio Geológico Colombiano, se compiló una base de datos de sismicidad instrumental para el período 1974 al 2020. A partir de esta última, se construyó el mapa mostrado en la Figura 3, y se calcularon distintos parámetros sísmicos como: deformación (DS), energía (ES) y levantamiento (U), con los parámetros flexurales de entrada resumidos en la Tabla 6. Cabe acotar que sólo se consideraron los sismos con profundidad menor o igual a 15 km [3] con el fin de analizar el aporte de estos a la deformación vertical.

Se detalla en la Figura 8, los principales eventos sísmicos en la zona, que ocurrieron en Fómeque el 18 de octubre de 1734 y en El Calvario el 24 de mayo del 2008, cuyas magnitudes fueron de 6,3 y 5,7 en la escala de Richter

respectivamente. El evento más reciente, con Mw 6,0, localizado en las coordenadas 4,454 grados latitud Norte y 73,635 longitud Oeste, a una profundidad de 3,9 km, generó diversos deslizamientos en la vía nacional Bogotá-Villavicencio, donde hubo pérdidas humanas en el año 2008 durante el bloqueo de la vía [29].

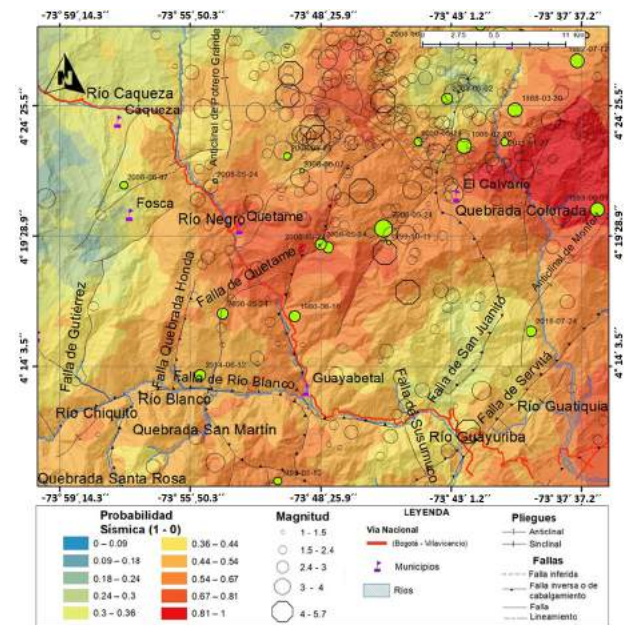


Figura 8. Mapa de sismicidad del sector estudiado, basado en los catálogos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), de sismicidad histórica, y la red nacional de sismos del Servicio Geológico Colombiano entre 1974 y 2020, reportados sobre mapa estructural del [7]. Igualmente, reporta la probabilidad sísmica en escala de colores, realizada por cokriging interpolando magnitud y profundidad en ArcGIS.

3.4. División en bloques litotectónicos

En la Figura 9, se presenta la delimitación litotectónica realizada de acuerdo con las fallas presentes en la zona de estudio e información estructural obtenida del perfil geológico provisto por [9]. El perfil antes mencionado se construyó tomando como base las líneas sísmicas de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), siendo posible comparar por sectores los distintos parámetros obtenidos en cada uno de los once dominios litotectónicos discriminados en esta investigación.

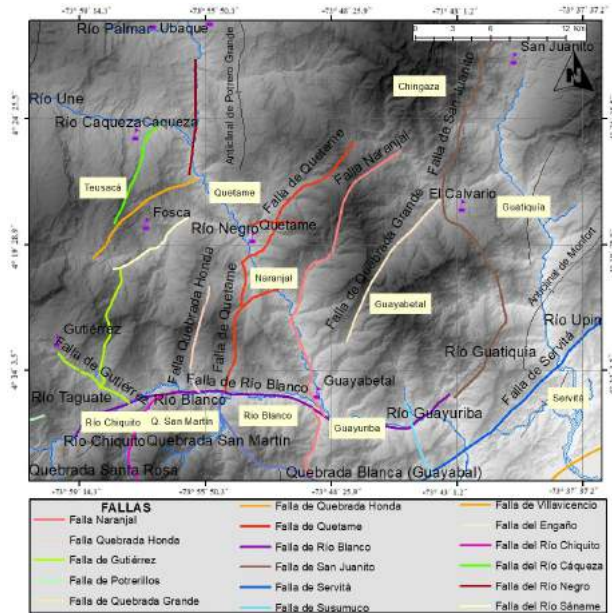


Figura 9. Delimitación de bloques litotectónicos (en fondo amarillo) propuestos entre las principales fallas en colores, tomadas del mapa geológico-estructural del SGC [7], donde la línea roja corresponde a la Vía Bogotá a Villavicencio S-E y los triángulos corresponden a los principales fenómenos de remoción en masa tomados del catálogo electrónico del Sistema de Información de Movimientos en Masa [30].

Posteriormente, empleando el modelo de elevación digital y la base de datos de precipitaciones de cada uno de los bloques litotectónicos, se calcularon los siguientes atributos primarios y secundarios del terreno: Relieve local a 1 y 2,3 km; integral hipsométrica (HI); capacidad de transporte de sedimentos (STI); índice topográfico de humedad (WI); índices de erosión: poder erosivo total (TSP, Total Stream Power), poder erosivo por cizalla SSP (Shear Stress Power) y poder erosivo unitario USP (Unit Stream Power); índice de gradiente longitudinal del canal (SL) e índice de empinamiento (ksn). Las ecuaciones para cada uno de estos parámetros se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Variables morfométricas, atributos primarios y secundarios del terreno calculados para la zona de estudio, a partir del modelo de elevación digital y la base de datos de precipitaciones.

Parámetro	Ecuación	Referencia
Relieve local (R)	$R = DEM - \min(DEM)$ Calculado usando radios de 1 y 2,3 km en ArcGIS	(2) [31]
Integral hipsométrica (HI)	$Hsi = \frac{Elevación\ promedio - Elevación\ mínima}{Elevación\ máxima - Elevación\ mínima}$	(3) [32]
Capacidad de transporte de sedimentos (STI)	$STI = (m + 1) \times (As / 22.13)^m \times \sin(S / 0.0896)^n$ As es el área de acumulación de flujo, y S es la pendiente. En esta investigación se asumió que m=0,4; n=1.	(4) [33, 34]
Índice topográfico de humedad (WI)	$WI = \ln\left(\frac{As}{\tan(S)}\right)$ As y S se definen igual al caso anterior	(5) [35]
Índice de erosión potencial a corto plazo (TSP, USP, SSP)	$EI_p = k \sum (A_p P)^m S^n$ A _p es el área de acumulación de flujo pesada por las precipitaciones (P) para cada píxel. K es el factor de erodabilidad, se asume en esta investigación k=1. Si m = n = 1, se obtiene la potencia total de flujo (TSP) Si m = 1/3 y n = 2/3 se obtiene la potencia por poder de cizalla (SSP) = 1/2 y n = 1, se obtiene la potencia por unidad del ancho del canal (USP)	(6) [36]
Índice de gradiente longitudinal del canal (SL)	$SL = \frac{(\Delta H * L)}{\Delta L}$ ΔH es el cambio en la elevación de la sección, ΔL es la longitud de ésta, y L es la longitud total desde el punto medio de la sección de interés hasta el punto más alto del canal aguas arriba.	(7) [37]
Índice de empinamiento (ksn)	$ksn = \frac{S}{A^{-\theta}}$ Ksn y θ son el índice de empinamiento, y la concavidad, respectivamente. Este índice fue calculado usando la herramienta TopoToolBox de Matlab, para ello es necesario determinar el área de acumulación de flujo tomando en cuenta el patrón de precipitaciones de la zona, y la pendiente a partir del modelo de elevación digital	(8) [38, 39, 40, 41]

Con la base de datos de sismicidad se calcularon: energía, deformación y levantamiento sísmico denotados como ES, DS y U, respectivamente (Tabla 6). Con la base de datos de isótopos cosmogénicos [19] se obtuvo las tasas de erosión actual calculada por isótopos cosmogénicos.

Tabla 6. Parámetros sísmicos calculados para la zona de estudio a partir de la base de datos de eventos sísmológicos reportados entre 1974 y 2020.

En particular, el índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) se visualiza en la Figura 11 (B). El índice de humedad topográfica (WI) se presenta en la Figura 11 (C), en la cual los sitios muy planos coinciden con las partes más húmedas del paisaje, tal como el sureste del área. El valor máximo del índice topográfico de humedad (WI) se presenta en el bloque de Servitá con un valor de 3,17 debido a su bajo relieve, el promedio en la zona es de 2,2 para el WI; mientras el índice STI presenta valores negativos y positivos asociado con zonas de sedimentación y erosión respectivamente, con valores positivos mayores para el bloque de Guayuriba de 0,045, lo que sugiere que este bloque, el cual se encuentra en el sector Chirajara, tiene un alto potencial erosivo y coincide con importantes deslizamientos en la zona.

Los índices de erosión potencial a corto plazo (EI), como el poder erosivo por cizalla (SSP, Shear Stress Power), se visualizan en la Figura 11 (D), el poder erosivo unitario (USP, Unit Stream Power) en la Figura 11(E) y el poder erosivo total (TSP, Total Stream Power) en la Figura 11 (F). El índice TSP presenta un promedio muy alto de 2,23E7 en el bloque Guayuriba, comparado con el promedio de todos los bloques de 3,6E6. Este comportamiento persiste con el índice USP, donde el bloque Guayuriba presenta el valor promedio de 685 que sobresale entre el promedio de todos los bloques de 275. También en el índice SSP, el bloque Guayuriba exhibe un valor alto de 54, siendo la mayor magnitud de este índice en los bloques donde se tiene una media de 32, siendo el bloque Guayuriba el que más presenta potencial erosivo a corto plazo, lo cual se debe a la confluencia del Río Negro y el Río Blanco en este bloque, por lo cual se concentra el alto poder erosivo en el Río Guayuriba. Después del bloque Guayuriba, el bloque Guatiquía exhibe un alto potencial erosivo en el índice USP y TSP con valores de 290 y 2,85E6, respectivamente.

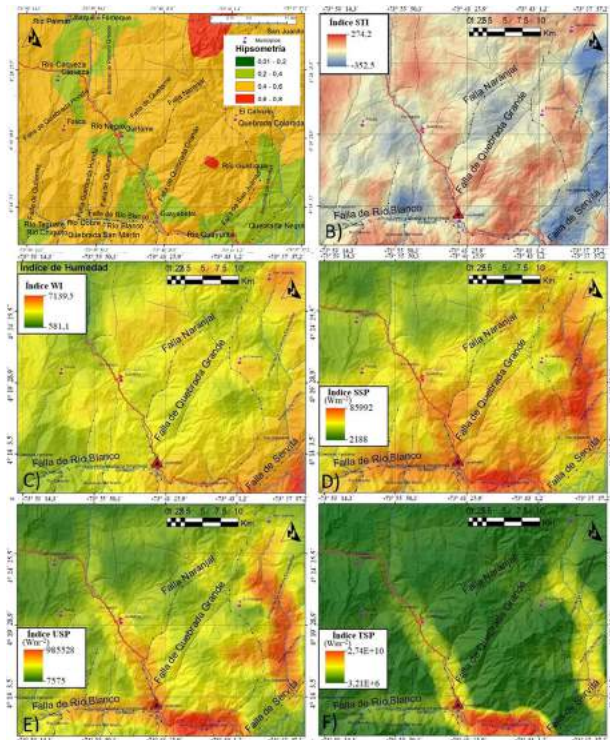


Figura 11. A) Mapa de valores de la integral hipsométrica en la zona de estudio, realizados con la herramienta TAK (Forte et al., 2019); **B)** Índice de transporte de sedimentos (STI); **C)** Índice Topográfico de Humedad (WI); **D)** Índice de erosión a corto plazo por poder de cizalla (SSP) (Wm^{-2}); **E)** Índice de erosión a corto plazo unitario por ancho del canal (USP) (Wm^{-2}); **F)** Índice de erosión a corto plazo total (TSP) (Wm^{-2}). Sobre cada uno de los mapas se muestran las principales fallas [7].

4.4. Índice del gradiente longitudinal del canal (SL) y empinamiento (ksn)

El índice SL se presenta en la Figura 12, para diferentes segmentos de perfiles longitudinales del Río Guayuriba. Además, se muestra el intervalo de precipitación y la litología presente en cada segmento. El índice SL presenta su valor máximo de 1321 en el bloque Guayuriba seguido del bloque de Río Blanco y Guayabetal, con 1112 y 939 respectivamente, siendo el promedio del índice SL en todos los bloques de 709.

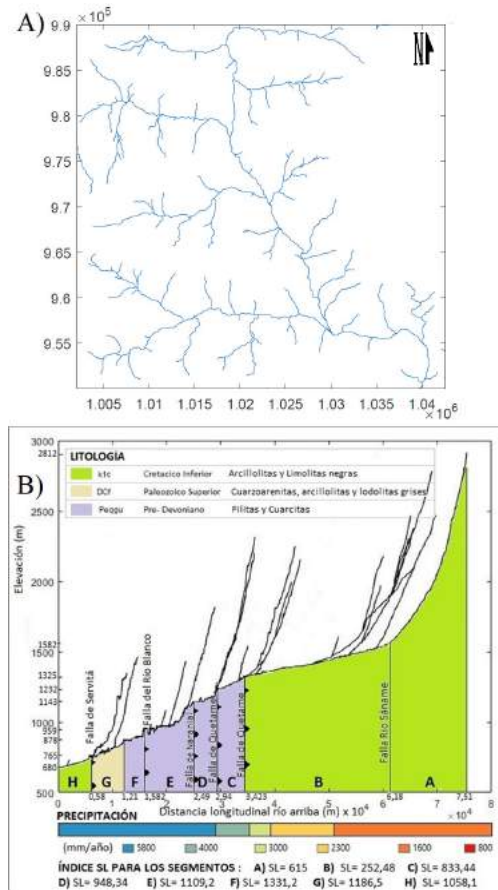


Figura 12. A) Red de drenajes de la cuenca del Río Guayuriba; **B)** Perfil del flujo para el río Guayuriba con valores del índice SL para cada segmento entre dos knickpoints, en el cual se interpretó visualmente colocando en yuxtaposición litologías, presencia de fallas y valores de precipitación media anual. Para la elaboración de esta figura se consideró el cambio de las tasas de precipitación con la altura y la distribución de fallas existentes en la zona [7].

En la Figura 13, se presenta el mapa con valores del índice ksn, Se observa en esta figura los sitios de muestreo con edades termocronológicas existentes. El índice ksn presenta una media de 243 para toda la zona siendo un valor alto de incisión, mientras el valor mínimo lo presenta el bloque de Servitá con 66.

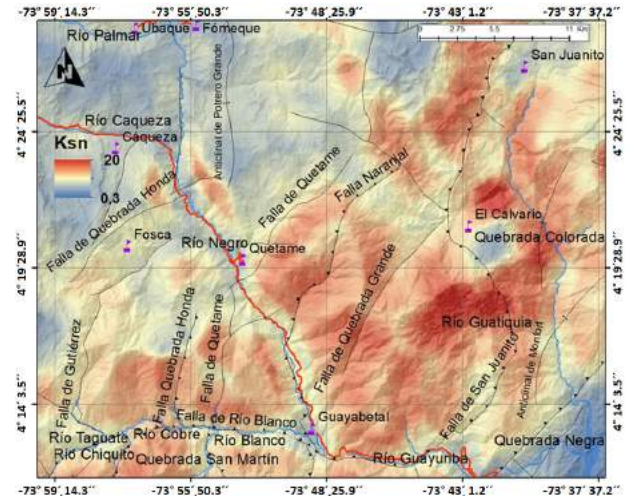


Figura 13. Mapa de índice de empinamiento (ksn). En este mapa se muestran las principales fallas de la zona [7].

4.5. Parámetros sismológicos (energía, deformación y levantamiento)

En los bloques litotectónicos de Naranjal y Guayabetal se registra la mayor actividad sísmica de la zona. En la Figura 14, se muestran los eventos sísmicos desde 1974 hasta el 2020 y los parámetros sísmicos calculados a partir de esa base de datos. En términos de la subdivisión en 4 y 16 cuadrantes, respectivamente, no introduce diferencias significativas en los valores b calculados. Sin embargo, debido a que la subdivisión está también relacionada con la escala de los fenómenos tectónicos observados, se decidió a lo largo de la investigación mantener ambas subdivisiones. La mayor deformación sísmica y levantamiento sísmico ocurre en la zona delimitada entre las fallas Naranjal y Quebrada Grande (Figuras 14 A y B). La energía sísmica liberada es mayor en el norte de la zona de estudio (Figuras 14 C y D).

La energía sísmica varía entre 1,18E5 J a 2,41E6 J para todos los bloques, y el valor promedio es 5E5 J. El valor máximo se encuentra en el bloque de Guayabetal 2,41E6 J, concentrándose la energía sísmica en este sector. Le siguen los bloques Quetame y Servitá con energía sísmica promedio de 5,545 J y 4,21E5 J, respectivamente. Se observa que estos bloques presentan los valores máximos de energía sísmica debido a que sus márgenes

corresponden con las principales estructuras del área como las fallas de Servitá, Quetame y Naranjal. El resto de los bloques presentan energía sísmica baja de $2,5E5 \pm 0,6E5$ J, comparado con los bloques de Guayabetal, Quetame y Servitá.

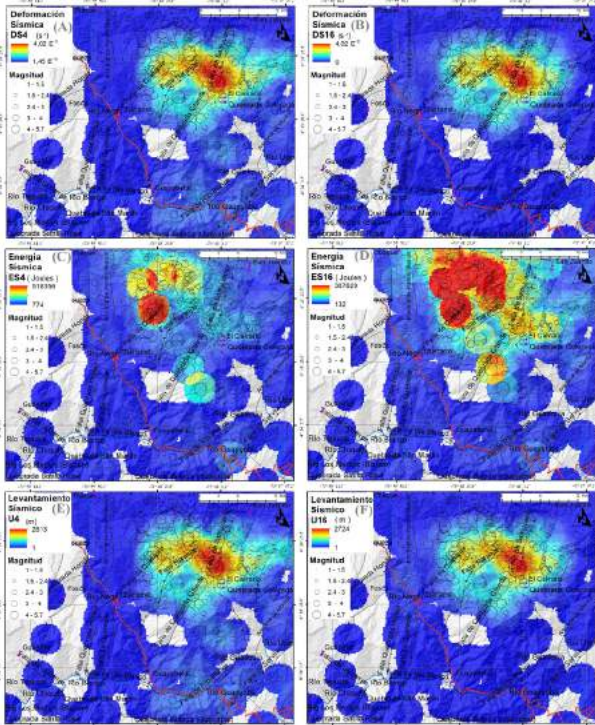


Figura 14. Parámetros sísmicos obtenidos al dividir la zona de estudio en 4 y 16 cuadrantes, respectivamente: **(A)** Deformación sísmica (DS4) y **(B)** Deformación sísmica (DS16). **(C)** Energía sísmica (ES4) y **(D)** Energía sísmica (ES16). **(E)** Levantamiento sísmico (LS4) y **(F)** Levantamiento sísmico (LS16), respectivamente. Se muestran las principales fallas geológicas de la zona [7].

4.6. Índice de erosión actual por datación de isótopos cosmogénicos (^{10}Be).

En las terrazas del Río Guayuriba, existen 7 estimaciones de tasas de incisión (01, 03-08; Figura 11) previamente determinadas [19] a partir de mediciones de Berilio-10, las cuales fueron interpoladas en esta investigación, obteniéndose tasas de ~ 75 mm/ka (muestras 01, 03, 04, 08; Figura 15), mientras que las tasas de erosión aumentan significativamente a valores de 100, 479 y 670

mm/ka (07, 05 y 06) hacia el sur de la zona de estudio, respectivamente.

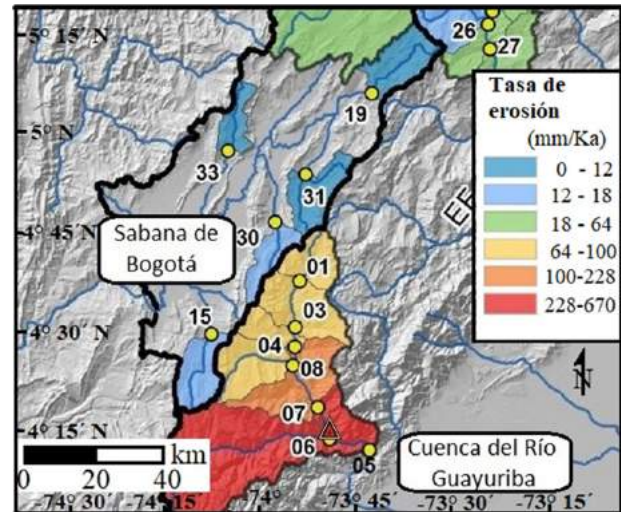


Figura 15. Distribución de tasas de erosión derivadas a partir de isótopos cosmogénicos (^{10}Be), donde el triángulo rojo-amarillo corresponde al deslizamiento del km 58. Los números enteros corresponden a muestras en terrazas fluviales de distintas cuencas de la cordillera oriental (Modificado [19]).

4.7. Tasa de erosión a largo plazo

La tasa de erosión a largo plazo promedio para toda el área es de 2,37 mm/año, siendo una tasa muy alta de erosión, donde los valores más altos se concentran al oriente, en el bloque Guatiquía, con una tasa de 3,47 mm/año, seguido por los bloques Guayuriba y Río Blanco con una tasa de 2,97 mm/año y 2,63 mm/año, respectivamente.

4.8. Resultados del modelo directo termocinématico

Las predicciones del modelo termocinématico directo de menor misfit (3,327) son mostradas en la Figura 16. Los parámetros de entrada como se mencionó anteriormente, fueron temperatura basal de 400°C y la producción de calor de $1,2$ mW/m². Se consideró además una topografía en equilibrio para simplificar el tiempo de cómputo.

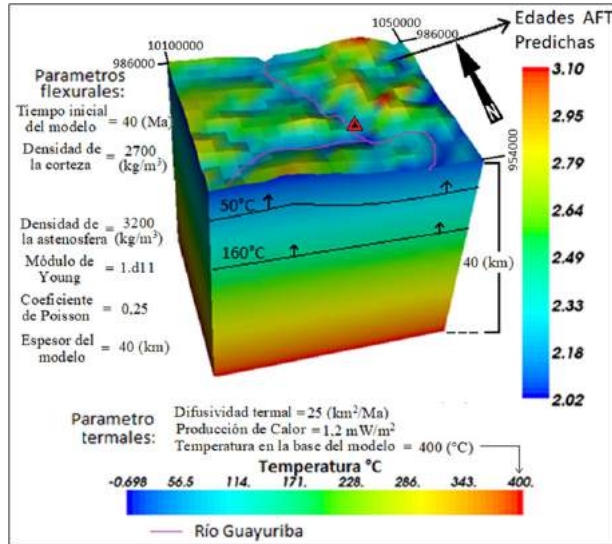


Figura 16. Edades AFT predichas por el modelo directo termocinématico 3D de menor misfit (3,327).

La Figura 17, resume la variación de las tasas de exhumación predichas para el modelo de menor misfit. Considerando tres fases de exhumación, se obtuvo el primer pulso entre 40 Ma y 25 Ma con una tasa de exhumación de 0,5 km/Ma. Luego en el segundo pulso entre 25 Ma y 15 Ma, la tasa de exhumación decrece a 0,1 km/Ma, y a partir de los 15 Ma hasta el presente, la tasa de exhumación aumenta abruptamente a 2 km/Ma. Las edades predichas se convirtieron a tasas de exhumación a largo plazo, las cuales están resumidas en la tabla 6.

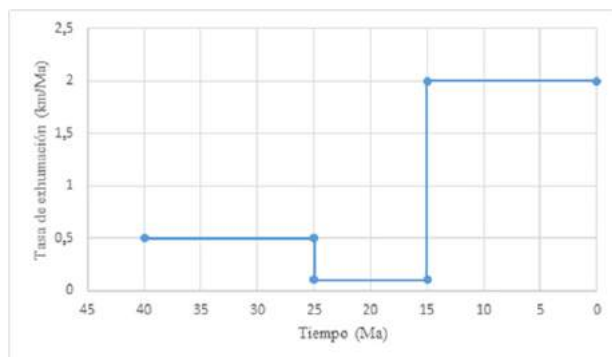


Figura 17. El gráfico ilustra las variaciones de las tasas de exhumación en el tiempo para el modelo de menor misfit (3,327).

Se presenta en la Figura 18, la comparación de perfiles edad-elevación sintéticos versus observados.

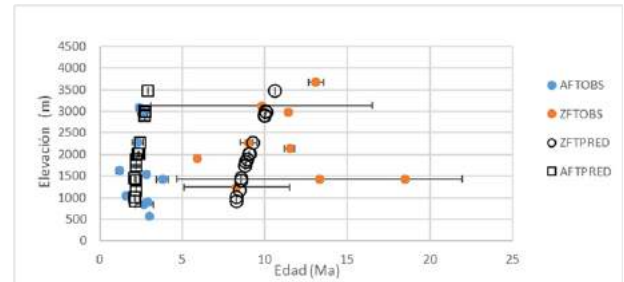


Figura 18. Comparación de relaciones edad-elevación observados (azul: AFT y naranja: ZFT) y predicho (cuadrados: AFT y círculos: ZFT) para el modelo de menor misfit (3,327).

Para la Figura 18, se realizó una regresión lineal con el propósito de obtener estimaciones de tasas de exhumación de los dos sistemas termocronológicos utilizados, obteniéndose valores de coeficientes de determinación: $R^2=0,9194$ y $R^2=0,9856$, para las edades AFT y ZFT, respectivamente. Adicionalmente, se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$\text{Elevación}[m] = 2663,4 \left[\frac{m}{Ma} \right] * \text{FTA}[Ma] - 4321,1[m] \quad (2)$$

$$\text{Elevación}[m] = 1058,6 \left[\frac{m}{Ma} \right] * \text{FTZ}[Ma] - 7657,4[m] \quad (3)$$

La tasa de erosión derivada de las relaciones edad AFT versus elevación es 2,6 km/Ma; mientras que la tasa de erosión estimada de las relaciones edad ZFT versus elevación es de 1 km/Ma. Tal diferencia entre ambas estimaciones sugiere que la velocidad de exhumación se ha incrementado desde los últimos 5 Ma. La Figura 19A muestra las edades de AFT predichas por el código PECUBE para toda la zona de estudio, y en más detalle las del Bloque Guayabetal en la Figura 19B, en el cual coinciden las mayores edades de AFT predichas con la deformación sísmica.

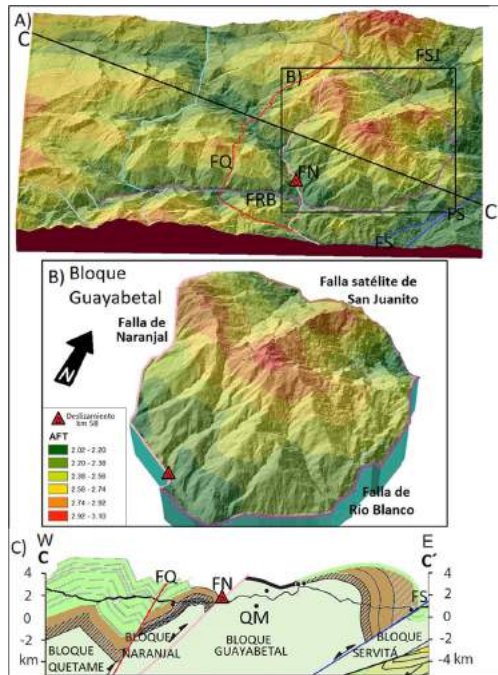


Figura 19. A) Edades AFT predichas por PECUBE para la zona de estudio. Las líneas de color son las fallas en el área: FSJ= Falla de San Juanito, FN= Falla de Naranjal, FQ= Falla de Quetame, FRB= Falla de Río Blanco, FS= Falla de Servitá [7]; **B)** Edades AFT predichas en el Bloque de Guayabetal; **C)** Perfil transversal de la zona de Estudio (Modificada [8]).

Finalmente, para facilitar la discusión, se presentan en la Tabla 7 los valores promedios de los parámetros geomorfológicos y sísmicos de cada uno de los bloques litotectónicos de la Figura 9.

Tabla 7. Valores promedios de control potencial para cada bloque litotectónico propuesto: ES = Energía Sísmica (Joules); DS = Tasa de deformación sísmica (s^{-1}); U = Levantamiento sísmico (m); P = Precipitación (m/año) para el período 1990-2019; STI = Índice de transporte de sedimentos; WI = Índice de humedad; TSP = Poder de flujo total (Wm^{-2}); USP = Poder de flujo unitario (Wm^{-2}); SSP = Poder de flujo por cizalla (Wm^{-2}); SL = Índice del gradiente longitudinal del canal (m); ksn = Índice de inclinación; HI = Integral Hipsométrica; R1 = Relieve radio 1-km (m); erAFT = Erosión a largo plazo observada

para datos AFT, er-CN = Erosión por datación de isótopos cosmogénicos (mm/ka).

Bloque	ESA	DSI $\times 10^{-4}$	U4	ES16	DSI $\times 10^{-4}$	U16	P	STI	WI	TSP	USP	SSP	SL	ksn	HI	R1	erAFT	erCN
T. caucal	6084,1	0,9	7,9	2178,7	3,0	19,6	2,0	2,2E-02	1,9	286046,3	108,4	18,0	463,7	259,9	0,5	1589,3	1,5	103,9
Quetame	6425,6	1,6	69,2	4688,1	2,8	18,1	2,9	-2,2E-02	2,0	672350,1	165,7	24,1	303,7	211,1	0,5	1718,5	1,9	135,4
Q. San Martín	3301,7	1,2	61,3	1590,9	0,01	0,2	4,1	3,7E-02	1,9	2347313,8	318,4	36,3	892,0	284,4	0,4	2212,3	2,2	346,1
R. Chiguito	1894,7	1,2	10,6	746,6	0,03	0,2	3,1	-2,2E-02	1,7	1076327,4	249,9	32,8	617,3	295,2	0,4	2224,8	2,0	263,5
Chigaza	8814,3	4,0	7,9	7121,6	4,2	27,5	3,7	1,2E-02	2,0	305113,8	183,7	26,1	339,9	287,9	0,6	2159,4	2,4	145,3
Naranjal	3438,1	4,7	7,8	2317,8	4,8	31,2	4,1	8,4E-04	2,1	2534552,1	266,6	32,7	794,8	281,3	0,4	2074,0	2,3	208,3
Guayabetal	15527,2	1,1	13,1	6906,3	4,6	30,1	5,0	-6,9E-03	2,2	1634755,9	278,8	34,3	939,4	273,6	0,5	2442,9	2,5	317,1
Quetame	7025,4	9,5	75,4	3997,6	3,3	21,6	5,2	-6,1E-02	2,4	2847799,5	290,7	33,8	426,3	258,3	0,4	2272,9	3,4	265,4
Servitá	4032,7	0,1	30,1	1253,9	0,04	0,3	6,0	-4,5E-02	3,2	2677215,6	177,2	22,3	387,1	66,3	0,3	1467,4	2,2	397,4
Guayumbó	5691,6	0,1	26,2	1794,4	0,04	0,2	6,9	5,4E-02	2,5	22311830,4	685,1	54,3	1321,3	219,9	0,4	1733,6	3,0	567,4
R. Blanco	2649,7	2,0	70,8	1239,4	0,04	0,2	5,0	-2,3E-02	2,3	2965740,6	306,1	35,4	1112,7	244,0	0,4	1883,7	2,6	527,6

5. DISCUSIÓN

Los Himalayas, Los Andes y los orógenos de Nueva Zelanda constituyen regiones claves donde las interacciones entre tectónica y aspectos climáticos, en particular el patrón de precipitaciones, han sido documentadas, las cuales pueden influenciar de manera fundamental la evolución

individual del relieve [45, 46]. Para el área de estudio estas relaciones son desconocidas. Con el propósito de facilitar la discusión, trataremos de dar respuestas a preguntas claves como, por ejemplo: ¿Cómo influye la sismicidad en los bloques con más deslizamientos (bloques surorientales)? ¿Qué bloques presentan correlaciones altas entre relieve y clima o relieve y tectónica? ¿Existirá acople entre los procesos climáticos y tectónicos?, si esto es así ¿En qué escala de tiempo se presentan tales interacciones?

Con los resultados de la Tabla 7, se realizó un análisis de correlaciones de Pearson, presentado bajo la forma de correlogramas y mostrado en la Figura 20. En la Figura 20A, se incorporan todos los bloques considerados, mientras que en la Figura 16B se consideraron sólo los bloques litotectónicos con mayor actividad sísmica cercanos a la zona de deslizamiento (Naranjal, Guayabeta, Guatiquía, Servitá, Guayuriba y R. Blanco). El incremento en los valores de la excentricidad (relaciones entre eje mayor y eje menor) de la elipse sugiere una mayor dispersión entre los pares de variables que están siendo comparados. En ambos correlogramas, las relaciones entre todos los parámetros sísmicos ES4, DS4, ES16, DS16, U4 y U16 son esperadas ya que son calculadas de la misma forma, por lo que son descartadas. Análogamente, las correlaciones entre las variables P, TSP, SSP, USP, WI, y STI tampoco deben ser consideradas porque todos los índices de erosión a corto plazo fueron pesados por las precipitaciones.

La Figura 20A muestra importantes relaciones ($r = 0,7$) entre la deformación sísmica calculada para toda el área dividida en cuatro cuadrantes DS4 y las tasas de erosión erAFT y erCN. Sin embargo, cuando se refina la escala incluyendo procesos locales, no se observan correlaciones entre DS16 y las tasas de erosión antes mencionadas. En contraste, correlaciones entre el patrón de precipitaciones P y las tasas de erosión erAFT y erCN soportaría los efectos de un control climático; la correlación entre P y erCN ($r = 0,8$) es ligeramente mayor que la de P y erAFT ($r=0,7$). Todos los índices de erosión a corto plazo TSP, USP y SSP correlacionan con ambas tasas

de erosión ($r \geq 0,5$). Sin embargo, los mayores valores de r se observan en las relaciones entre TSP, USP, SSP y erCN ($r \geq 0,7$). La correlación entre ksn y R1 ($r = 0,7$), sugiere que el relieve actual está siendo afectado por los procesos de incisión de ríos; pero a su vez, la pérdida de correlación entre R1 y las tasas de erosión erAFT y erCN ($r \leq 0,4$), al igual que R1 y P ($r < 0$), sugieren que al considerar todos los bloques no se puede discriminar controles tectónicos o climáticos sobre el relieve.

En contraste, la Figura 20B, para los bloques con mayor actividad sísmica, refleja una importante relación entre R1 y ES4 ($r = 0,6$), R1 y ES16 ($r = 0,8$), R1 y DS16 ($r = 0,8$) y U16 ($r = 0,8$). Para estas zonas, la correlación entre relieve R1 y P es negativa ($r = -0,6$). Con respecto a las tasas de erosión, se observa que localmente la tectónica no pareciera controlar las tasas de erosión obtenidas de las edades AFT ya que no existe correlación entre ES16, DS16 y U16 con erAFT. Sin embargo, la correlación entre U4 y erAFT ($r = 0,6$) sugiere que globalmente la tectónica tiene una influencia importante sobre las tasas de erosión derivada de las edades AFT y sobre el relieve. Observando las correlaciones entre P y erCN ($r = 0,7$), y los índices TSP con erCN ($r=0,6$) y USP versus erCN ($r = 0,6$) sugiere un desacople entre aspectos climáticos y tectónicos. A partir de cierto momento, la precipitación pareciera controlar las tasas de erosión más recientes.

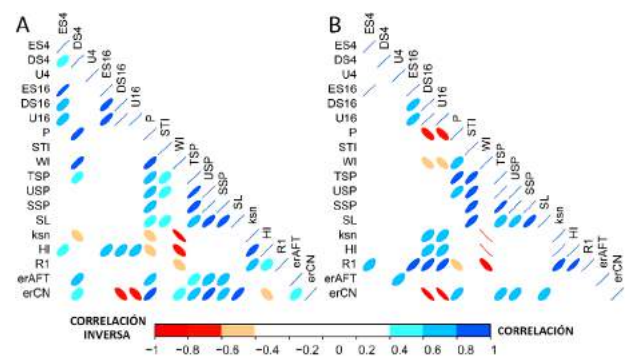


Figura 20. Correlogramas (A) para todos los bloques litotectónicos considerados, (B) sólo los cercanos a la zona de deslizamientos;

El análisis realizado sugiere que la morfología actual del área de estudio no es afectada uniformemente por la

tectónica y las precipitaciones. Se pueden distinguir dos áreas distintas de control, la primera localizada en el noroccidente (Bloques de Teusacá, Chingaza y Quetame; Figura 1B) con tasas bajas de erosión y actividad tectónica donde la evolución del paisaje es más pasiva, y el relieve correlaciona fuertemente con la precipitación, siendo ésta el principal factor que controla esta área noroccidental. Por otra parte, la relación de la precipitación con las tasas de erosión a corto y a largo plazo en toda la zona, sugieren el control del clima en el rejuvenecimiento de la superficie.

La segunda zona se encuentra en el macizo de Quetame y en el piedemonte llanero, representado por los bloques surorientales (Guatiquía, Guayabetal, Guayuriba, Naranjal, Servitá y Río Blanco). En estas zonas es donde ocurrió el deslizamiento que motivó el presente estudio y posiblemente exista una concentración de actividad sísmica a lo largo del tiempo donde se evidencia el aporte tectónico para la formación de estos bloques, sugerido por la relación del relieve con los parámetros sísmicos (DS16 y U16). Sin embargo, esta observación debe ser tomada con cautela ya que la ventana de tiempo observado es menor a 50 años. Aunque el control tectónico es significativo, recientemente el clima ha rejuvenecido el paisaje, posiblemente desde el Pleistoceno. Una vez que se produce la rápida exhumación (~2 km/Ma) del macizo de Quetame (Parra et al., 2009), se genera una barrera orográfica en la cual los vientos húmedos provenientes del Amazonas se concentran, lo cual explicaría por qué los termocronómetros muy someros, cómo en el caso de los isótopos cosmogénicos por ^{10}Be (erCN), correlacionan con la variable precipitación.

Relación entre interacciones clima-tectónica en el deslizamiento del km 58

Para el deslizamiento del km 58 presente el bloque litotectónico de Guayabetal, un alto grado de criticidad resulta cuando se combinan altas susceptibilidades en esta zona suroriental del área de estudio, debida a factores topográficos (geomorfología abrupta producida por la concentración de deformaciones en el flanco oriental), geológicos (la litología de terrazas aluviales

colgadas con alta disección sobre filitas fracturadas), climáticos (precipitación muy alta con más de 7 m/año) y sísmicos (la falla de Naranjal) influye de manera directa en el deslizamiento al estar a menos de 1 km de la zona. Observando el catálogo sísmico se discriminó un evento en Quetame de magnitud 1,8 y profundidad de 1,4 km el 13 de junio del 2019, esto coincidió con el día que se inició el movimiento en el deslizamiento de estudio, asumiendo por lo tanto que la transferencia de la deformación cosísmica se hizo a través de dicha falla transfiriendo cargas vibratorias las cuales producen un aumento del esfuerzo cortante y aumento de la presión de poros, creando estos aumentos una disminución en la resistencia por acción de las deformaciones las cuales disminuyen notablemente el factor de seguridad del talud.

En este caso, el deslizamiento complejo en su mayoría de tipo traslacional ha sufrido disección alta en el talud desde el primer movimiento antes mencionado, quedó expuesto al recibir una mayor erosión, reactivando la zona y generando una zona de alto riesgo. Hasta el momento, la erosión de la ladera no había sido considerada la compleja interacción entre clima-tectónica y exhumación de bloques litotectónicos no se había tomado en cuenta. Una importante reactivación de fallas en el bloque Guayabetal posiblemente transfirió la deformación cosísmica por la falla de Naranjal hasta el lugar del deslizamiento donde la litología (filitas cuarzosas fracturadas y sobre ellas terrazas coluvio-aluviales colgadas) amplificarían la onda sísmica.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelado directo termocinématico 3D permitió establecer la historia de exhumación de este sector de la Cordillera Oriental, los tres pulsos y sus velocidades, corroborando la hipótesis de levantamiento rápido conducido principalmente por la tectónica en el primer pulso entre 40 Ma y 25 Ma con una tasa etapa de exhumación lenta de 0,1 km/Ma, luego se aceleró esta exhumación en un segundo pulso ocurrido entre 25 Ma a 15 Ma con una velocidad 0,5 km/Ma controlada por

la tectónica más que por el clima y, posteriormente un levantamiento reciente en el último y tercer pulso entre 15 Ma con tasas considerablemente altas (2 km/Ma), conducido por la interacción de clima y tectónica.

El principal factor dominante del paisaje hoy en día es la incisión fluvial primariamente impulsada por el incremento en la pendiente regional del orógeno por acumulación progresiva del acortamiento y engrosamiento cortical [19]. A nivel general la tectónica, ejercería un control importante sobre el relieve, pero su efecto disminuiría sobre las tasas de erosión a largo y corto plazo. Se toma un importante rol el clima para explicar las tasas de erosión.

La actividad tectónica puede estar creando topografía en zonas de alta sismicidad (Bloques Guayuriba, Río Blanco y Guayabeta), y en conjunción con el clima han incrementado la incisión fluvial del Río Blanco y el Río Negro, ambos tributarios del Río Guayuriba.

La morfología actual del área de estudio no es afectada de la misma forma por la tectónica y el clima, se pueden distinguir dos áreas distintas, la primera localizada en el NW con tasas bajas de erosión y actividad tectónica donde la evolución del paisaje es más pasiva y donde el relieve correlaciona fuertemente con la precipitación, siendo el clima el principal factor que controla los bloques NW: Teusacá, Chingaza, Quetame. La segunda zona se encuentra desde macizo de Quetame hasta el piedemonte oriental, correspondiendo a los bloques SE; en esta zona se concentra de actividad sísmica con las principales estructuras presentes como las Fallas de Naranjal, Quetame, San Juanito y Servitá con alto potencial sísmogénico. Las fuertes relaciones de los parámetros sísmicos con el relieve y el índice de incisión k_{sn} sugieren que la tectónica controló la formación de esta zona controlando el acortamiento y engrosamiento del orógeno el cual incrementó la pendiente aumentando el poder erosivo de incisión (k_{sn}) hasta el Pleistoceno, cuando el clima rejuvenece los bloques SE.

Un aspecto que no pudo ser evaluado en la zona es el impacto de las intervenciones antrópicas sobre el relieve,

a futuro sería vital incluir esa información en este tipo de análisis.

Esta relación del efecto sísmico en la estabilidad de taludes relacionado con la constante interacción de factores operantes como la tectónica, clima y la exhumación de un determinado bloque desencadenando un fenómeno de remoción en masa de una magnitud e impacto nacional representa una contribución al conocimiento de las geociencias a la geología aplicada o la ingeniería geológica.

Se recomienda a futuro fechar mediante isótopos cosmogénicos las muestras seleccionadas en la terraza objeto de este estudio. Adicionalmente, sería ideal incorporar esas nuevas edades con el propósito de realizar modelos termocinemáticos inversos.

7. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Sogamoso Colombia, por el apoyo brindado durante el desarrollo de la presente investigación. Especialmente, por el financiamiento proporcionado a través del proyecto DIN-SGI-2666 de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), y por el financiamiento proporcionado a través de las convocatorias de movilidad internacional que permitieron la estancia del Dr. Greg Hoke en la UPTC durante las campañas de muestreo de terrazas cercanas a la zona de estudio.

REFERENCIAS

- [1] Bermúdez, M., van der Beek, P., Bernet, M. "Asynchronous Miocene–Pliocene exhumation of the central Venezuelan Andes," *Geology*, v. 39, p. 139-142, doi:10.1130/G31582.1, 2011.
- [2] Bermúdez, M., van der Beek, P., Bernet, M. "Exhumación Diacrónica durante el Mioceno-Plioceno de Los Andes de Mérida" *Revista Tribuna del Investigador*, Universidad Central de Venezuela, v. 12, (2), p. 20 – 23, 2011.

- [3] Bermúdez, M., van der Beek, P., Bernet, M. "Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes" *Lithosphere*, The Geological Society of America. doi: 10.1130/L212.1. 2013.
- [4] Braun, J. "PECUBE: A new finite-element code to solve the 3D heat transport equation including the effects of a time-varying, finite amplitude surface topography" *Computers & Geosciences*, 29, 787–794, 2003.
- [5] Braun, J., van der Beek, P., Batt, G. "Quantitative Thermochronology. Numerical Methods for the Interpretation of Thermochronological Data" *Cambridge university*. 272 p, 2006.
- [6] Braun, J., van der Beek, P., Valla, P., Robert, X., Herman, F., Glotzbach, C., Pedersen, V., Perry, C., Simon-Labric, T., and Prigent, C. "Quantifying rates of landscape evolution and tectonic processes by thermochronology and numerical modeling of crustal heat transport using PECUBE" *Tectonophysics*, v. 524-525, p. 1-28, 2012.
- [7] Gómez-Tapia, J., Montes, N.E., Nivia, Á., Diederix, H. "Mapa Geológico de Colombia 2015: Escala 1:100 000," *Servicio Geológico Colombiano*, Bogotá, 2 hojas, 2015.
- [8] Mora, A., Parra, M., Strecker, M. R., Sobel, E. R., Hooghiemstra, H., Torres, V., and Vallejo-Jaramillo, J. "Climatic forcing of asymmetric orogenic evolution in the Eastern Cordillera of Colombia" *Geol. Soc. Am. Bull.*, 120, 930 – 949, doi:10.1130/ B26186.1. 2008.
- [9] Parra, M., Mora, A., Sobel, E.R., Strecket, M., González, R. "Episodic orogenic front migration in the northern Andes: Constraints from low-temperature thermochronology in the Eastern Cordillera, Colombia." *Tectonics*, 28, TC4004, doi:10.1029/2008TC002423. 2009.
- [10] Cediél, F., Shaw, R. P., Cáceres, C. "Tectonic assembly of the Northern Andean block": 815–848. Retrieved from <http://archives.datapages.com/data/specpubs/memoir79/CHAPTER37/CHAPTER37.HTM> 2003.
- [11] Mora, A., Parra, M., Strecker, M. R., Kammer A., Dimaté, C., and Rodriguez, F. "Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia." *Tectonics*, 25, TC2010, doi:10.1029/2005TC001854. 2006.
- [12] Bakun, W. H., and Wentworth, C.M. "Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data, Bull." *Seism. Soc. Am.*, 87: 1502–1521. 1997.
- [13] Salcedo, Elkin y Augusto Gómez. "Estudio macrosísmico del terremoto del 18 de octubre de 1743 en la región central de Colombia." *Boletín de Geología* 35 (1): 109-128. 2013.
- [14] Guerrero, J. "A proposal on the classification of System Tracts: Application to the Allostratigraphy and Sequence Stratigraphy of the Cretaceous Colombian Basin Part 1: Berrriasian to Hauterivian": *Geología Colombiana*, No 27. Bogotá. 2002.
- [15] Ulloa et al. "Caracterización de Unidades Geológicas y Geomorfológicas de Colombia – Formación Fómeque, Formación Lutitas de Macanal": INGEOMINAS, Bogotá. 2000.
- [16] Renzoni, G., "Geología del Macizo de Quetame. Geología Colombiana", *Universidad Nacional de Colombia*, Facultad de Ciencias, Departamento de Geología, Bogotá. No. 5: p.75-127, 1968.
- [17] Pulido, O., y Gómez, L. "Geología de la plancha 266 – Villavicencio (Informe y mapa a escala 1:100.000)": INGEOMINAS, Bogotá. 2001.
- [18] Campbell, C.J., & Burgl, H. "Section Through the Eastern Cordillera of Colombia, South America." *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 76, 1965.
- [19] Struth, L., Babault, J., Teixell, A. "Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes." *Geomorphology*, 250, 370-383, doi: 10.1016/j.geomorph.2015.09.012. 2015.
- [20] Perne, M., Covington, M. D., Thaler, E. A., & Myre, J. M. "Steady state, erosional continuity, and the topography of landscapes developed in layered rocks." *Earth Surf, Dynam.*, 5(1), 85-100. doi:10.5194/esurf-5-85-2017, 2017.

- [21] Brandon, M.T., Roden-Tice, M.K., Garver, J.I. "Late Cenozoic exhumation of the Cascadia wedge in the Olympic Mountains northwest Washington state." *Geological Society of America Bulletin* 110, 985 – 1009, 1998.
- [22] Bassin, C., Laske, G., Masters, G. "The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America." *EOS Trans AGU*, 81, F897bassin laskte, 2000.
- [23] Laske, G., Masters, G., Ma, Z., Pasyanos, M., Update on CRUST1.0- A 1-degree Global Model of Earth's Crust: *Geophys. Res. Abstracts*, 15, Abstract EGU2013-2658, 2013.
- [24] Wagner G., y Van Den Haute P. "Fission-Track Dating": *Dordrecht (Kluwer Academic Publishers)*. 285 pp. *Mineralogical Magazine*, 57(389), 760-761. doi:10.1180/minmag.1993.057.389.28 1992.
- [25] Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Cardozo, N. "Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes." *GSA Bulletin*, v.117 (9), p.1272-1292, 2005.
- [26] Braun, J., Robert, X. "Constraints on the rate of post-orogenic erosional decay from low-temperature thermochronological data: application to the Dabie Shan, China." *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 30, p. 1203-1225, 2005.
- [27] Watson, D. F. y Philip, G. M. "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation" *Geoprocessing* 2:315–327, 1985.
- [28] UTGS, "Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca del Río Guayuriba, Unión temporal Guayuriba sostenible," Bogotá D. C. *Recuperado de* ftp://rioguayuriba%7Canonymous@200.21.21.36/ Anexo_5_1_Tomo_3_Fase_Diagnostico/ Cap 4, pag 79-83, 2018.
- [29] Clarín. "El epicentro fue en El Calvario, 50 km. al sudeste De Bogotá," 25 de mayo del 2008, *Clarín*. Recuperado de: https://www.clarin.com/ediciones-antteriores/terremoto-colombia-dejo-muertos_0_SJ4GTz6RaFl.html 2008.
- [30] SIMMA. "Sistema de Información de Movimientos en Masa." Bogotá, *Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano, catálogo de movimientos en masa* (<http://simma.sgc.gov.co/#/>, consultada en junio de 2020).
- [31] Montgomery, D. R., & Brandon, M. T. "Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges." *Earth and Planetary Science Letters*, 201(3), 481-489. doi: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00725-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00725-2), 2002.
- [32] Pike, R.J., Wilson, S.E. "Elevation-Relief Ratio, Hypsometric Integral and Geomorphic Area—Altitude Analysis." *Geological Society of America Bulletin*, 82, 1079-1084. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[1079:ERHIAG\]2.O.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[1079:ERHIAG]2.O.CO;2), 1971.
- [33] Moore, I.D., Burch, G.J. "Physical Basis of the Length Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation." *Soil Science Society of America*, 50, 1294-1298.
- [34] Goulsbra, C., Evans, M., Lindsay, J. "Temporary streams in a peatland catchment: the pattern and timing of stream network expansion and contraction and controls on these." *Geophys. Res. Abstr.*, 14, EGU2012-11014-1, 2012.
- [35] Beven, K.J. Kirkby, M.J. "Un modelo de hidrología de cuenca de contribución variable con base física." *Boletín de Ciencias Hidrológicas*, 24 (1): 43–69. doi : 10.1080 / 02626667909491834, 1979.
- [36] Tucker, G., y Slingerland, R. " Drainage basin responses to climate change", *Water Resources research*, Vol. 33, NO. 8, Pages 2031-2047, 1997.
- [37] Hack, J. "Stream-profile analysis and stream-gradient index." *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, p 421-429, 1973.
- [38] Flint, J. "Stream gradient as a function of order magnitude and discharge." *Water Resource. Res.* 10, 969–973, 1974.
- [39] Whipple, K., y Tucker, G., "Dynamics of the stream-power model: implications for the height limits of mountain ranges, landscape response timescales and research needs." *J. Geophys. Res.* 104, 17661–17674, 1999.
- [40] Schwanghart, W., Kuhn, N. J. "TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis," *Environ, Modell. Softw.*, 25, 770–781, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.013>

org/10.1016/j.envsoft.2009.12.002,. a, b, 2010.

- [41] Schwanghart, W., Scherler, D. "Short Communication: TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences." *Earth Surf, Dynam.*, 2, 1–7, <https://doi.org/10.5194/esurf-2-1-2014>,. a, b, 2014.
- [42] Gutenberg, B., Richter, C.F. "Seismicity of the Earth and Associated Phenomena." *Princeton, New Jersey*, Princeton University Press, 245 p, 1954.
- [43] Braun, J., Burbidge, D.R., Gesto, F.N., Sandiford, M., Gleadow, A.J.W., Kohn, B.P., Cummins, P.R. "Constraints on the current rate of deformation and surface uplift of the Australian continent from a new seismic database and low-T thermochronological data." *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 56, p. 99–110, doi:10.1080/08120090802546977, 2009.
- [44] Kendall, M.G., Stuart, A., "The Advanced Theory of Statistics," v. 2: *Inference and Relationship*: Griffin. ISBN 0-85264-215-6, 1973.
- [45] Koons, P. O., Zeitler, P. K., Chamberlain, C. P., Craw, D., and Melzer, A. S., "Mechanical links between river erosion and metamorphism in Nanga Parbat, Pakistan Himalaya", *Am. J. Sci.*, 302, 749– 773, doi:10.2475/ajs.302.9.749, 2002.
- [46] Sobel, E.R., Hilley, G.E., Strecker, M.R. "Formation of internally drained contractional basins by aridity-limited bedrock incision." *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 108, 2344, doi: 10.1029/2002JB001883, 2003.

AVANCES DE LA INFORMÁTICA FORENSE EN COLOMBIA EN LOS ÚLTIMOS CUATRO AÑOS

Advances in computer forensics in Colombia in the last four years

José Jhon Kennedy Bustamante Riaño¹

¹Facultad de Ingeniería de Sistemas Virtual, Fundación Universitaria del Área Andina Semillero Informática Forense (Bogotá D.C.)
Email: 1jbustamante14@estudiantes.areandina.edu.co

(Recibido 03 de agosto de 2021 y aceptado 18 de agosto de 2021)

Resumen

Este trabajo de investigación expone, inicialmente, cómo con el crecimiento de los avances tecnológicos que surgen a favor de la sociedad para procesar, guardar y asegurar grandes volúmenes de datos informáticos; paralelamente, se convierten en herramientas estratégicas en su contra, ya sea para eliminarlos o alterarlos; de acuerdo con los propósitos inescrupulosos de quienes cometen los delitos informáticos, problemática creciente que vulnera la confidencia e intelecto de la información. En consecuencia, se desarrolla un trabajo cualitativo, en el cual también se reconoce los conocimientos adquiridos en este proceso de investigación frente a las competencias básicas para el dominio de esta temática. Por esta razón, el presente estudio revela un panorama general acerca de cómo ha sido la evolución de la informática forense en una pesquisa hecha entre los años 2017 al 2020, especificando algunos fundamentos, procedimientos y normativas, útiles en el proceso de recuperación de información y recolección de evidencia digital en el momento de un incidente; en este mismo sentido, se exponen cifras acerca de la vulneración que han tenido algunas industrias y, a partir de esto, se evidencia cómo actúan los delincuentes informáticos.

Palabras claves: *análisis forense, informática forense, cadena de custodia, pruebas digitales, delitos informáticos.*

Abstract

This research work shows, initially, how with the growth of technological advances that arise in favor of society to process, store and secure large volumes of computer data; in parallel, they become strategic tools against them, either to eliminate or alter them; according to the unscrupulous purposes of those who commit computer crimes, a growing problem that violates the confidentiality and intellect of information. Consequently, a qualitative work is carried out, in which the knowledge acquired in this research process is also recognized against the basic competences for domaining this subject. For this reason, the present study reveals an overview of how the evolution of forensic informatics has been in a research carried out among 2017 to 2020, specifying some bases, procedures and regulations, useful in the process of information retrieval and collection of digital evidence at the time of an incident; in this same sense, data are presented about the violation that some industries have had and, from this, it is evident how computer criminals act.

Key words: *forensic analysis, computer forensics, chain of custody, digital evidence, cybercrime.*

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tecnología de la información y las comunicaciones permite que el procesamiento de datos se presente de una manera ágil y oportuna; sin embargo, estos quedan expuestos ante diversas vulnerabilidades de ataques informáticos o actos que atentan contra las leyes que rigen el derecho a la privacidad y la seguridad informática. La seguridad informática orientada a proteger los distintos recursos tecnológicos se ve amenazada porque nacen grandes e innovadores ataques informáticos que pueden generar daños considerables a los usuarios de las TICS, así como a las organizaciones gubernamentales y entidades privadas. Desde esta perspectiva, se aborda en el presente trabajo de investigación la informática forense como una estrategia de análisis que permite identificar, proteger, mitigar, salvaguardar la información y, así mismo, estudiar el dispositivo electrónico en el que ocurrió el delito informático o la escena del delito en la red que permita analizar las pruebas digitales. Por otra parte, Corrales y Osorio (2015) nombrado en [1] afirma que, si bien el mundo tecnológico es complejo, también adolece de diversas debilidades por fallas provocadas por el hombre, del programa o técnicas en la infraestructura de procesamiento de datos, señal de la tendencia de los intrusos informáticos amenazantes que desestabilizan la economía y el equilibrio social de una nación, generando conflictos, guerras, etc. (p.15)

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Hoy en día los avances tecnológicos, se encuentran en constante evolución, permitiendo que millones de personas interactúen con facilidad. Gracias a estos recursos, se puede comunicar rápidamente desde cualquier parte del planeta, mediante dispositivos como: computadores, celulares inteligentes, redes sociales y muchos otros medios electrónicos. Cabe resaltar la gran cantidad de información y datos que se maneja diariamente, la cual es susceptible de ser vulnerada, captada, hurtada, generando posibles ataques a los medios informáticos. Esta agresión cibernética, la puede sufrir cualquier persona que usa o no la tecnología como

medio de comunicación, y con ello ser víctima de fraudes financieros, infección de virus, denegación de servicios, *phishing* e innumerables ataques que día a día aparecen con su evolución. [2] Actualmente, el uso de la tecnología de información y comunicación se ha visto encaminada a la mejora continua de la sociedad, tanto en las entidades públicas, privadas, económicas que almacenan grandes cantidades de datos (Información).

Así también, el avance tecnológico en la gran mayoría de trabajos que se desempeñan en el mundo requiere la utilización de infraestructura, herramientas y personal con conocimientos en el manejo de ésta; así mismo, los grandes cambios en la tecnología han hecho que muchas empresas de tipo privado, gubernamentales y personales, tengan que mejorar los insumos tecnológicos, ayudando así a enriquecer o duplicar su productividad y eficiencia. La utilización continua de estas herramientas tecnológicas ha convertido a los seres humanos en personas dependientes y, el manejo excesivo los absorbe, llegando a enfrentarlos a situaciones en donde su práctica, en muchos casos, se ha convertido en un campo de batalla, ya que con el uso continuo se presta para que los delincuentes, encuentren una forma de vulnerar la seguridad.

De acuerdo con [3] afirma que los beneficios que se le dan a estos medios tecnológicos son grandes, pero también hay muchos aspectos negativos encontrados en su empleo, toda vez que su uso continuo y desmesurado ha permitido que se genere vulnerabilidades. Por esta razón, la aparición de herramientas tecnológicas de software y hardware, han ayudado a verificar los sistemas tecnológicos, previniendo así los ataques a la Información. Es aquí donde la Informática Forense juega uno de los papeles importantes, ya que ella estudia los procesos que se deben tener en cuenta para una buena recolección de evidencias; esta busca preservar que los datos informáticos, se encuentren a salvo, y evitar que caigan en manos equivocadas, así también, esclarecer el cómo, cuándo y dónde ocurrieron los hechos. Algunas leyes que protegen la información en Colombia, “Ley 1273”, tiene como objetivo primordial salvaguardar la Información y protección de los sistemas de tecnología de la información

y las Telecomunicaciones, la cual contempla capítulos específicos: “Ataques a la confidencialidad, integridad y disponibilidad de datos y sistemas informáticos, así como ataques informáticos y otras violaciones”, estas leyes nos sirven de guía para proteger jurídicamente los datos de las Empresas, Gobiernos y personas del común. En este sentido, [4] en su trabajo de investigación recopila algunos datos sobre el crimen informático en Colombia como muestra la Fig.1.



Figura 1. Delitos Informáticos en Colombia [4](p.4)

Actualmente, en Colombia, la cibercriminalidad exhibe incremento del número de incidentes cibernéticos; como consecuencia, empresas y ciudadanos han denunciado al menos 30.410 casos en el 2019, los cuales infringen la ley 1273 del 2009, cifra que corresponde al 57% de los casos denunciados. En este orden de ideas, [2] deja entrever que los índices de cibercriminalidad han flagelado a nuestro país en los últimos años; de la misma manera, es notable observar cómo los delincuentes informáticos usan diferentes métodos y herramientas para cometer los delitos, al crear nuevas estrategias para la vulneración de los equipos como muestra la Fig.2.



Figura 2. Ciudades más afectadas por los delitos Informáticos [4] p.5

La mayoría de las vulneraciones permiten identificar la manera cómo actúan los ciberdelincuentes, así como, las técnicas utilizadas y las herramientas implementadas; en este lugar, se debe tener y tomar conciencia acerca de la importancia de conocer que existen delitos referentes a temas tecnológicos y que los delincuentes están al acecho; por esta razón, no se debe bajar la guardia frente a este tipo de crimen. En este sentido es vital tener conocimientos y capacitación de las personas, logrando establecer una barrera. Es entonces la pedagogía, la mejor herramienta, frente a un delito informático para que los criminales no logren su objetivo. No obstante, esto no quiere decir que se puedan eliminar del todo, ya que los delincuentes cada día fraguan nuevas estrategias para vulnerar los sistemas informáticos y comentar sus actos delictivos.

3. OBJETIVOS

General: Describir cómo ha sido la evolución de la Informática Forense en Colombia en los últimos cuatro años (2017-2020).

Específicos:

- Explicar origen y reconocimiento de la Informática Forense en Colombia.
- Identificar cuáles han sido las prácticas o experiencias aplicadas.
- Enunciar cuáles son las entidades que regulan la Informática Forense en Colombia

4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, la tecnología está avanzando a pasos agigantados y, con ella, el estilo en que los seres humanos actúan. Ahora bien, toda la información es almacenada en dispositivos electrónicos según el uso para el que aplique, esto genera ventajas tales como: alta disponibilidad en cualquier momento, facilidad en el manejo de la información, etc. En este sentido, también existe riesgos frente al manejo de la información, por lo cual se establecen estrategias para resguardar los datos informáticos, evitando con esto su

posible vulneración. En concordancia con lo anterior, [4] manifiesta que, en Colombia en los últimos años, el tema de ciberdelincuencia ha tomado índices elevados, en ocasiones por desinformación o ingenuidad de los usuarios. Es en este momento, los delincuentes se aprovechan del usuario y su desinformación, para apoderarse de la confianza de los consumidores y cometer sus fechorías. Por consiguiente, con el presente proyecto de investigación se tiene como propósito identificar cómo ha sido la evolución de la informática forense en Colombia en los últimos 4 años (2017 – 2020) y cómo la Informática Forense permite fortalecer procesos de aprendizaje y construcción de conocimiento básico para la implementación en la seguridad informática. No obstante, se debe tener en cuenta que la informática forense es un tema complejo y se deben tomar medidas de seguridad extremas para el personal que se especializa en el manejo de dicha evidencia, de tal manera que, se pueda evitar cualquier error que conduzca al fracaso del proceso legal. Algunas técnicas que deben seguir al realizar procedimientos forenses informáticos se enuncian a continuación:

- Reconocer un incidente.
- Compilar evidencias.
- Resguardar evidencias
- Examinar evidencias
- Justificar y mostrar de los resultados

Según Piedrahita, 2014 anunciado en [5] la etapa del análisis forense es el procedimiento que sigue un investigador profesional para corregir los procesos forenses. Por consiguiente, las técnicas aplicadas al análisis forense informático sirven para garantizar la efectividad al momento de proceder y la diplomacia de la seguridad que se implementa al interior de una compañía u organización, cuyo fin es proteger los datos informáticos y la infraestructura que detecta las vulnerabilidades dentro de las empresas ayudando a mitigar los riesgos con el uso de los procedimientos legales, técnicas de recolección y equipos tecnológicos y aplicaciones para una correcta implementación para el análisis forense digital.

Desde el abordaje teórico, la informática forense se define como la disciplina que articula elementos del derecho y la informática, gracias a estas bondades, recopila y analiza datos de sistemas informáticos, redes, comunicaciones inalámbricas y dispositivos de almacenamiento de una manera que se pueda utilizar como prueba ante los tribunales. Esto significa que, es una disciplina que previene ataques informáticos, ayudada del análisis y las técnicas científicas a instalaciones técnicas; de esa manera, posibilita asemejar, salvar y examinar medios informáticos, así como, conseguir argumentos y evidenciar una infracción informática, con el fin de presentar estas mismas, ante un tribunal.

A. *Informática Forense* es un método complicado en su manejo, se debe exagerar en referencia a la seguridad, al recurso humano técnico en la administración de evidencias, así se evitará que se ejecute errores que involucre fracasos en el procesamiento jurídico legal.

B. *Cadena de custodia* tiene como finalidad ofrecer apoyo efectivo a argumentos digitales ante un ente judicial, se conoce como el correcto proceder. Por consiguiente, se deben instituir procesos adecuados garantizando la eficacia de los métodos empleados al extraer evidencia informática. El meticoloso proceso garantiza bases sólidas para el juzgamiento y la validez delante del fuero judicial, por esta razón, es necesario que se eviten suplantaciones, transformaciones, variaciones y falsificaciones en cada una de estas etapas.

C. *Evidencia Digital* el autor expresa [7] (p.9) que toda información manipulable del ser humano, sacada de medios de datos informáticos, que lleguen a servir como evidencia para presentar en procesos legales y jurídicos los cuales se puede fraccionar en:

1. Investigaciones informáticas acumuladas en equipos, ya sea por medio de correos electrónicos, medios digitales, imágenes, etc.
2. Anotaciones generadas por equipos de tecnología, auditorías, evidencia de transacciones, registros de

eventos, etc.

3. Evidencias creadas y guardadas en aparatos tecnológicos tales como consultas a bases de datos, hojas de cálculo con información financiera, etc.

Según [8] quien considera que una infracción informática es “comportamientos antijurídicos, no éticos o no considerados, referentes a los procesos que involucran datos y/o transmisión de datos”(p.8) En este sentido, el delito informático es la forma en la que se quebranta la información y los datos personales; y en este caso, la informática forense es la encargada de observar conductas delictivas, antijurídicas frente a técnicas informáticas o su infraestructura.

5. ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DE ANTECEDENTES

En primer lugar, este trabajo investigativo realiza una explicación breve de dónde surge la informática forense rastreando su historia, a través de los conceptos expuestos por otros investigadores que ya han hecho estudio de casos relacionados con la misma. El autor [9] en su trabajo de indagación “Análisis de la evidencia digital en Colombia como soporte Judicial de delitos informáticos mediante cadena de custodia”. La seguridad informática y lo relacionado con delitos informáticos en Colombia, es un tema relativamente nuevo. La informática forense se introduce como una serie estructurada de pasos que permiten la recolección, análisis y tratamiento de evidencia digital con el fin de dar solución a algún evento de seguridad informática.

Los conocimientos ganados sobre la seguridad informática son realizados por métodos, técnicas y procedimientos, implementados en otros países o naciones, tomando como ejemplo los casos de estudio y el análisis hechos en otros contextos. Particularmente, en Colombia, se acogen todas estas técnicas y se modifican según las normas y leyes que rigen a nuestro país. Las investigaciones en el mundo de la Informática forense son exhaustivas, muchas de ellas están encaminadas a diferentes campos de la computación forense.

En [10] en su trabajo investigativo “*Informática Forense en Colombia*” manifiesta que los instrumentos usados en la informática forense, permiten examinar conductos regulares provenientes de los actos indecorosos que se presentan en la informática, en muchos ambientes como: Laboral, Judicial, Educativo, Financiero, Gubernamental y muchos otros, que también se ven afectados con el uso de la Tecnología de la Información. Entonces, se hace uso de la IF, siendo esta la ciencia encargada de efectuar los estudios en la escena del crimen, de las redes o los equipos electrónicos que contengan la información; para lo cual, busca identificar, recolectar y analizar pruebas digitales que esclarezcan y prevengan casos similares.

6. DISCUSIÓN

Son diversas las exploraciones que se han llevado a cabo en el contexto del cómputo forense, como las cosmovisiones y espectros desde donde los distintos autores han estudiado sus herramientas y procedimientos técnicos. De esta forma desde una perspectiva nacional y cosmopolita se exponen algunos planteamientos como los siguientes:

Según [10] en su trabajo de investigación “*Informática Forense en Colombia*”, plantea un análisis desde los grandes avances tecnológicos que permiten almacenar grandes volúmenes de información en diferentes medios electrónicos, haciendo más fácil su manipulación y procesamiento, en últimas, facilitando la vida a los usuarios; sin embargo, también estos avances han abierto las puertas tanto a los delitos informáticos como a innumerables situaciones de vulneración a los datos.

7. RESULTADOS

Se antepone una breve reseña histórica de dónde nace la informática forense, dedicando un pequeño acápite de los orígenes. Según [11] en su trabajo investigativo acerca del análisis de la ciencia forense digital en Colombia, Florida. Identificó por primera vez delitos en sistemas informáticos en 1978. La informática comenzó en 1980,

y en 1984, el FBI creó el programa “Magnetic Media Program, Computer Analysis and Response Team”, tiempo después, apareció el Sr. Michael Anderson era un agente del Departamento de Investigación Criminal del Servicio de Impuestos Internos de los Estados Unidos quien fue conocido como el padre de la informática forense hasta mediados de la década de 1990 cuando cooperó con el gobierno y luego creó nuevas tecnologías” (p.20)

En 2004, gracias a la Policía Nacional de Colombia, la informática forense se convirtió en una ciencia de apoyo a las investigaciones judiciales, es decir, los efectos nocivos y negativos provocados por el abuso de los medios informáticos y el aumento de las tasas de criminalidad desde entonces. El diario El Tiempo destacó este punto, que comprobó que se crearon 7.360 virus este año (2004), un aumento del 32% con respecto al año anterior (2003), y los problemas de seguridad informática aumentaron en un 93%. La pérdida equivale a 666 millones dólares a entidades bancarias. Por esta razón, es necesario crear una entidad que realice el rol de las investigaciones forenses dirigidas específicamente a los medios informáticos. Desde entonces, ha surgido la Dirección de Investigación Criminal, que ha apoyado la labor de la Policía Nacional desde un principio; no obstante, necesitan el apoyo de las instituciones de control. En ese sentido, es vital que existan entidades con estructuras mejor jerarquizadas para brindar soluciones óptimas a estos temas.

La Auditoría General, que tiene a su cargo las investigaciones, los juicios tributarios y la jurisdicción obligatoria de la Contraloría General de la Nación, ha creado un laboratorio de informática forense para determinar hechos ilícitos o fraudulentos en los que se encuentran en riesgo bienes nacionales. La investigación criminal forense en Colombia comenzó a estar en boga en el 2004, y para los próximos años, el Estado colombiano ha venido creando normas sobre seguridad de la información, como se observa en la Fig. 3.



Figura 3. Histórico de delitos informáticos [10]

En 2004, se creó una entidad de apoyo para problemas de seguridad informática, y desde entonces, esta ha realizado múltiples investigaciones. Algunas de ellas fueron desarrolladas en 2006, sin embargo, es importante destacar uno de los casos de investigación forense más importantes del país. En 2008, el Ejército Colombiano confiscó las computadoras de Raúl Reyes miembro de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC) durante la Operación Fénix. “Según el Ministro de Defensa de Colombia, Juan Manuel Santos, los investigadores encontraron más de 16.000 archivos en tres computadoras portátiles, halladas en el campo de exterminio de Reyes”, informó el New York Times. En seguida, la Fiscalía Pericial, realizó un análisis detallado de estos elementos para extraer la mayor cantidad de información posible.

El ciberdelito mundial está creciendo a un ritmo bastante rápido y continúan surgiendo nuevas tendencias. Los ciberdelincuentes se están volviendo cada vez más especializados, capaces de utilizar nuevas tecnologías con fines de lucro, adoptar nuevos métodos para ajustar y establecer redes cooperativas para que puedan llevar a cabo ataques cibernéticos en pocos minutos.

2017

La delincuencia online aumentó un 28% en 2017, provocando pérdidas de más de 50 mil millones de pesos. Según [12], el ciberdelito representa una amenaza creciente para la seguridad de Colombia. Según datos

de DIJÍN, durante 2017, las autoridades buscaban la forma de abordar este panorama, primero a través de la coordinación de investigaciones y operativos entre la Policía y la Fiscalía. Este año, una de las ofensivas más peligrosas de Internet es el *Blue Whale Challenge*. Un juego diseñado en Rusia y difundido por todo el mundo, en el que niños y jóvenes afrontan el reto de hacerse daño física y psicológicamente y acabar por suicidarse. En Colombia, las autoridades emitieron 508 advertencias para el juego, que abarcan a más de 6 millones de personas. Durante el año, la policía bloqueó 3.891 páginas web que contenían pornografía infantil.

Como resultado, 56 personas fueron arrestadas, con lo anterior, es evidente que Colombia no es inmune a los grandes ciberataques a escala mundial. Para este año, el programa malicioso *Wannacry*, que secuestró los datos del dispositivo atacado, afectó a más de 150 países y se convirtió en uno de los ataques más famosos de la historia de Internet, con posibles amenazas internacionales.

2018

Colombia reportó 22.366 casos de delitos informáticos. Según [13] durante 2018, el número de casos relacionados con delitos informáticos aumentó en un 40%; es decir, de 15.962 en 2017 pasó a 22.366 casos registrados por las autoridades. Lo que significa, que el cibercrimen, por ejemplo, a nivel de incidentes informáticos, fue de 8.090 en 2017 frente a 11.529 en 2018, un aumento similar de 46%. Actualmente [14] según el coronel Fredy Bautista, el cibercrimen es el segundo elemento delictivo tipificado como actividades ilegales, que trae el mayor beneficio para los delincuentes, se estima hasta 8 mil millones de dólares en delitos cibernéticos para 2022. En Colombia, las cifras no son muy alentadoras, el número de denuncias de víctimas sigue aumentando año tras año; un ejemplo de ello, son las 12,014 denuncias relacionadas con el robo de computadoras.

Esto significa que el 55% de los delitos, están relacionados con el fraude y el robo de cuentas bancarias. En 2018, los informes de ciberataques aumentaron en un 42%, de ellos, se denunciaron 11.524 casos a la Policía Nacional.

Este ente de control revela un aumento significativo de las amenazas y los desafíos cada vez más severos que enfrentan los bancos y las empresas para proteger su ciberseguridad, lo que significa que hay una media de 131 millones de intentos de ciberataques al día.

2019

Los métodos de ataque más comunes siguen siendo el *phishing* y la *social engineering*. Este tipo de fraudes, se valen de la negligencia o ignorancia momentánea de los usuarios para convertirlos en copias fraudulentas de sitios web. A fines de 2019, las autoridades informaron que los incidentes cibernéticos en el país habían aumentado en un 54% en comparación con 2018. En este caso en particular, el ataque cibernético aprovechó una vulnerabilidad en Windows que fue corregida por Microsoft; no obstante, al final requerían que los usuarios actualizarán sus sistemas para evitar el daño.

2020

[15] El delito de más rápido crecimiento en 2020 es el engaño de sitios web, en el que se registraron 1.224 casos en 2019 y 5.051 respectivamente, reportados en el centro de control policial durante el año. Lo que significa un aumento del 313%. Como se muestra en las Figuras (4-5).

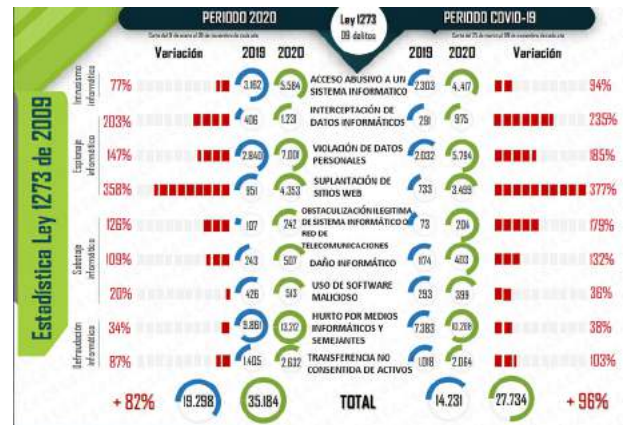


Figura 4. Estadística ley 1273 de 2009 [15]

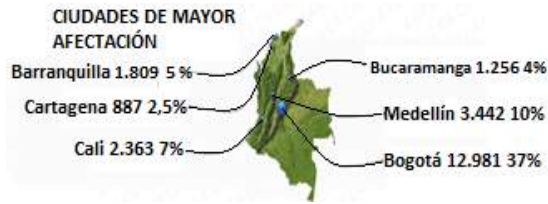


Figura 5. Ciudades con mayor afectación criminal [15]

Así también, para este año, el centro de control policial manejó 11,950 incidentes y 7,862 correos electrónicos a través de CAI virtual. Como se ilustra en la Figura 6.

- 845 intercambios de comunicaciones internacionales.
 - Análisis 640 muestras de malware.
- 180 charlas de prevención para niños y jóvenes, padres y profesores.



Figura 6. Resultados Operacionales y Principales modalidades [15]

8. CASOS

[16] En Barranquilla, el Centro de Policía Cibernética de la DIJIN capturó a una organización criminal dedicada al fraude informático contra diversas entidades financieras, por valor de más de 10 mil millones de pesos (US \$ 10,000,000,000), de los cuales 326 cuentas financieras fueron afectadas, que fueron incidentes relacionados con el pago de salarios de la seguridad social a través de PSE. [16] advierte, además que investigadores del centro de la red policial capturaron a 8 miembros de una peligrosa pandilla en Barranquilla. La pandilla se infiltró en la empresa para liberar cuentas salariales y logró robar más de \$77.128.5 mil millones de pesos; el patrón delictivo incluyó el desarrollo de programas informáticos para

violación de los servicios de banca virtual, como el acceso remoto y el uso desprevenido de computadoras sin el nivel de seguridad requerido. Algunos de los organismos que cumplen vigilancia sobre los crímenes cibernéticos, se relacionan en seguida:

Policía Nacional: [1] En Colombia mediante el decreto 1000 de noviembre 5 de 1891, manifiesta la organización de un grupo llamado Policía Nacional, que más adelante se convierte en el inicio de este cuerpo policial conocido como la Policía Nacional de Colombia, a su vez, adopta “el propósito principal de la agencia, a saber, mantener la convivencia como condición necesaria para el ejercicio de los derechos y libertades públicas, y asegurar que los residentes colombianos convivan pacíficamente de acuerdo con las normas “como misión de la ética policial”, mediante la innovación, uso de herramientas técnicas y optimización de recursos “.

Procuraduría General de la Nación [1] dentro de su misión establece: La Procuraduría General es una entidad que representa a los ciudadanos ante el estado. Es el máximo órgano del Ministerio de Asuntos Públicos y también está integrado por la Defensoría del Pueblo y las personas jurídicas. Tiene la responsabilidad de iniciar, adelantar y suspender las investigaciones de acuerdo con lo establecido en el “Código Disciplinario Único” o la Ley No. 734 de 2002 porque estas investigaciones se realizan contra servidores públicos y personas que desempeñan funciones públicas o manejan fondos estatales por violaciones a la ley anteriormente relacionada.

9. CONCLUSIONES

Con la presente revisión investigativa, se logró conocer y analizar cómo desde otras perspectivas o cosmovisiones de diferentes autores se ha abordado la Informática Forense, así como, las herramientas para su aplicación. En esta pesquisa, se encontró diversas miradas investigativas desde donde se han trabajado enfoques que hacen alusión a: la auditoría forense, los marcos normativos, los estudios de caso, el funcionamiento e instalación de un programa, el paso a paso del procedimiento forense,

entre otros; por consiguiente, en la medida que dichos marcos metodológicos se pongan en práctica, se requiere de conocimiento y dominio de los procedimientos técnicos y de sus herramientas.

La IF es una ciencia que permite realizar investigaciones sobre los delitos informáticos, de donde se obtienen evidencias necesarias para aclarar un delito informático, las cuales son validadas en un estrado judicial, determinando si una persona es culpable o no. Con lo anterior, es pertinente afirmar que, las personas deben conocer sobre la tipología delictiva, en especial, toda aquella que involucra el uso y la evolución tecnológico. Así también, se hace necesario crear mecanismos a través de los cuales los estudiantes de Ingeniería de Sistemas adquieran los conocimientos pertinentes en cuanto a la IF, su análisis, sus herramientas de software y hardware, profundizando en temas afines, aplicando lo aprendido en el área destinada para la adquisición de procedimientos Informáticos.


Este trabajo de revisión investigativa, enfatiza en el buen uso y manejo cuidadoso de los datos, la información, la infraestructura, que se constituyen como los activos más importantes en este mundo lleno de tecnología. Así también es menester resaltar que, que la Informática Forense brinda las herramientas y técnicas necesarias para mitigar los ataques informáticos, igualmente, permite reconocer que todo usuario está expuesto y no se encuentra excepto a sufrir de ataques cibernéticos y, por lo mismo, se debe tener los conocimientos necesarios para lograr reaccionar de forma frente a estas situaciones delictivas. En consecuencia, con esta revisión se lograrán reconocer futuros trabajos investigativos acerca de herramientas de software que permitan resolver problemas relacionados con ataques informáticos y, especialmente, herramientas de software libre.

REFERENCIAS

- [1] O. Meneses Obando, «Judiciales Que Cuentan Con El Servicio Especializado De Peritaje Informático En Colombia,» Universidad Externado de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia, 2019.
- [2] W. Pedreros Martínez y J. Suárez Urrutia, «Herramientas Aplicadas En El Desarrollo Del Análisis Forense Informático En Colombia,» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., 2016.
- [3] P. Ayazo Villadiego, «Uso De La Informática Forense Aplicada A Delitos Informáticos En La Industria Colombiana,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia “Unad”, Momil – Córdoba, 2019.
- [4] A. Ceballos López, F. Bautista García , L. Mesa Guzmán y C. Arguez Quintero, «Tendencias Ciberdelitos en Colombia 2019-2020,» Centro Cibernético Policial, Bogotá, 2019.
- [5] Y. Atehortúa y F. Jaramillo, «Análisis de herramientas open source para la informática forense con énfasis en la recolección de evidencia digital,» Instituto Técnico Metropolitano, Medellín, 2018.
- [6] L. Enrique Arellano y M. Castañeda, «La cadena de custodia informático-forense,» Revista ACTIVA, pp. 67-81, 2012.
- [7] F. Bautista , J. Mosquera, A. Meneses y D. Rios, «Evidencia Digital procedimientos técnicos,» Rama Judicial Concejo Superior de la Judicatura, Bogotá, 2020.
- [8] J. de la Ossa y R. Baena, «Notas sobre Informática Forense,» Universidad Cooperativa de Colombia, Montería, 2016. [En línea]. Available: doi: <http://dx.doi.org/10.16925/greylit.1903>
- [9] A. Ramírez y F. Castro, «Análisis de la evidencia digital en Colombia como soporte judicial de delitos informáticos mediante cadena de custodia,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia “UNAD”, Villavicencio, 2018.
- [10] F. Castillo y J. Bohada, «Informática Forense en Colombia,» Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT) | Vol. II, p. 12, 2015.
- [11] A. Jaramillo y L. Torres, «Estado del análisis forense digital en Colombia,» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, D.C., 2016.
- [12] P. S. S.A, «El ciberdelito en 2017: la amenaza crece sobre Colombia,» 8 junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.semana.com/nacion/>

articulo/cibercrimen-en-colombia-balance-de-2017/551979/.

- [13] R. 360 , «En 2018 se reportaron 22.366 casos de delitos informáticos en Colombia,» 17 mayo 2019. [En línea]. Available: <https://360radio.com.co/en-2018-se-reportaron-22-366-casos-de-delitos-informaticos-en-colombia/#:~:text=En%202018%20se%20reportaron%2022.366%20casos%20de%20delitos%20informáticos%20en%20Colombia.>
- [14] D. Arias, «Colombia, el país con más ransomware en Latinoamérica, en 2018,» 15 Mayo 2019. [En línea]. Available: [https://www.enter.co/empresas/colombia-ataques-ciberneticos-18/.](https://www.enter.co/empresas/colombia-ataques-ciberneticos-18/)
- [15] E. Espectador, «En 2019 se registraron 48 billones de intentos de ciberataques en Colombia,» 11 Marzo 2020. [En línea]. Available: [https://www.elespectador.com/tecnologia/en-2019-se-registraron-48-billones-de-intentos-de-ciberataques-en-colombia-article-908787/.](https://www.elespectador.com/tecnologia/en-2019-se-registraron-48-billones-de-intentos-de-ciberataques-en-colombia-article-908787/)
- [16] C. C. Policial, «Operación DARKODE,» 5 abril 2021. [En línea]. Available: <https://caivirtual.policia.gov.co/ciberseguridad/casos-operativos/operacion-darkode.>
- [17] L. Herrera, «Informática forense,» 2015. [En línea]. Available: https://digitk.areandina.edu.co/bitstream/handle/areandina/1955/RP_eje2.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [18] S. Rosero, «Diseño de una metodología de recolección de evidencia digital para análisis forense de unidades de disco duro, basada en la norma ISO/IEC 27037:2012”,» Universidad Internacional SEK, Quito, 2019.



CRITERIOS GENERALES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, SECCIONAL SOGAMOSO

La Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo I2+D, es una publicación que se edita semestralmente y maneja una convocatoria permanente, financiada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Seccional Sogamoso-Boyacá, Colombia, creada en el año 2005. Tiene como misión publicar y divulgar artículos científicos, productos de una investigación, en todos los campos de la ingeniería y tecnología: Industrial, electrónica y comunicaciones, ciencias de la tierra, sistemas y computación, ingeniería de los materiales, ingeniería electromecánica, ambiental, transporte y vías, y otras afines.

Ingeniería, Investigación y Desarrollo invita a toda la comunidad académica e investigativa de instituciones públicas y privadas, regionales, nacionales e internacionales, tales como investigadores, grupos y semilleros de investigación, docentes, estudiantes, directivos de ingeniería y demás interesados en temáticas relacionadas con las diferentes áreas de la Ingeniería, para que presenten sus contribuciones y trabajos inéditos, en español o inglés. Podrán publicarse artículos originales, de investigación y/o innovación tecnológica.

Los artículos sometidos serán evaluados previamente por el comité editorial, y por pares evaluadores externos o internos antes de su publicación, que se reservan el derecho de decidir sobre su publicación. Los pares revisores emitirán un concepto sobre el contenido del artículo desde la calidad y el rigor científico, en el formato de evaluación establecido por la revista. Las observaciones y sugerencias manifestadas por los evaluadores serán enviadas a los autores para que realicen los respectivos ajustes, con el fin de decidir si el artículo cumple con las condiciones para ser publicable o no. La Revista siempre utilizará el sistema de “par doble ciego” En este proceso se da un espacio de correspondencia entre el editor y los autores para los ajustes necesarios. Los tiempos de publicación de un artículo dependerán en gran medida de la oportuna respuesta que los autores den a cada requerimiento del editor, los trabajos enviados a “Ingeniería, Investigación y Desarrollo” no podrán ser sometidos simultáneamente a evaluación por otro medio de publicación. La aceptación de un artículo por parte del comité editorial, no implica que vaya a ser publicado, el contenido de los trabajos es responsabilidad exclusiva de sus autores. No se devolverán los originales de los trabajos.

Todos los artículos deben matricularse en la plataforma OJS, accesible desde el sitio web www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa, junto con la carta de presentación, firmada por los autores, para realizar el proceso de matrícula del manuscrito el autor debe compilar previamente un formulario de registro, escogiendo la opción de autor, donde le será asignado un usuario y contraseña para que pueda realizar el envío del documento. Por medio de este mismo enlace podrá ser consultada y descargada la plantilla de presentación de artículos y el modelo de la carta de cesión de derechos de autores estipulado por la revista.

Extensión del artículo: Los artículos se presentan en hojas tamaño carta con márgenes superior: 3 cm, derecho: 2 cm, izquierdo: 3 cm e inferior: 2 cm, a espacio sencillo, doble columna, letra calibri y un contenido de máximo 10 páginas.

Estructura: Secciones: título, resumen, palabras clave, introducción, materiales y métodos, resultados, discusión, conclusiones, agradecimiento (si procede) y referencias. Para las tres primeras secciones se requiere, además, su traducción al inglés (title, abstract and keywords), que se colocará inmediatamente debajo de la versión en español.

Título: se sugiere no exceder de 15 palabras.

Resumen: máximo 250 palabras, el propósito del trabajo, los métodos empleados, resultados más significativos y conclusiones más importantes. Se redactará en un solo párrafo, en tiempo presente y modo impersonal. No incluirá abreviaturas, siglas, citas bibliográficas ni referencias a tablas o figuras.

Palabras clave: en orden alfabético, 4 o 5 términos relacionados con el contenido del artículo.

Introducción: tratará el tema específico del trabajo e informará sobre el propósito, importancia, aplicación práctica de la investigación y conocimiento actual del tema.

Materiales y métodos: proveerá suficiente información para que el experimento pueda repetirse bajo las mismas condiciones. Cuando los métodos, técnicas y procedimientos empleados sean muy conocidos, bastará con mencionarlos. Si se modifica un método de otro investigador deberá aportarse la cita y explicar detalladamente la modificación; pero si el método es nuevo, se describirá en detalle. Cuando se trate de investigaciones de campo, deberán aparecer las características del área de estudio y del muestreo.

Resultados: se expondrán mediante texto, figuras, tablas, cuidando no repetir una misma información en más de una forma, en esta sección se deben presentar los resultados hallados en la investigación.

Discusión: se explicarán los datos experimentales y se compararán con los resultados obtenidos por otros investigadores. Las secciones de Resultados y Discusión podrán presentarse de forma independiente o combinada, según preferencia del autor.

Agradecimientos: será el lugar para reconocer la ayuda de personas e instituciones que aportaron significativamente al desarrollo de la investigación.

Referencias: Las referencias bibliográficas y citas, deben atender al estilo IEEE, se registrarán solamente los trabajos citados en el texto, que deberán tener un nivel adecuado de actualización, las referencias deben hacerse por orden de aparición en el artículo. Téngase en cuenta que la actualidad de las referencias es un elemento de gran peso en la evaluación de la calidad de los artículos, se debe adicionar el DOI a las referencias bibliográficas que lo tengan.

Para obtener la plantilla de presentación de artículos, por favor diríjase al correo: revistaid@uptc.edu.co o al enlace: www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa, a la sección Acerca de.



**REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
SECCIONAL SOGAMOSO
SUSCRIPCIÓN / SUBSCRIPTIONS**

Nombre/Name: _____ C.C. _____

Apellidos/Last Name: _____

Profesión/Profession: _____

Departamento académico/Academic department: _____

Dirección de Envío/Address: _____

Teléfono/Telephone Number: _____ ext: _____ Fax: _____

Oficina/: _____

Ciudad/City: _____

País/Country: _____

Correo Electrónico/Email: _____

Suscripción a partir del número/ Subscription from number : _____

Firma: _____

Envíe este formato totalmente diligenciado a: revistaiid@uptc.edu.co; a vuelta de correo recibirá el ejemplar solicitado de la revista I2+D. La suscripción a la Revista I2+D es totalmente gratuita.

Correspondencia, Canje y Suscripciones

**REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO I2+D
Calle 4 Sur N° 15-134 Tels.: (57+8) 7705450, 770 6896, 770 7721
Ext. 2606**

Uptc Sogamoso-Boyacá, Colombia

E-mail: revistaiid@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa

DOI: <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>



Ingeniería, Investigación y Desarrollo

ISSN: 1900-771X Impreso

ISSN: 2422-4324 En línea