





EXPLORANDO LA EVOLUCIÓN
GEOLÓGICA DE ZONAS DEFORMADAS EN LA
CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA
MEDIANTE MODELADO **TERMOCINEMÁTICO 3D**

Mauricio Alberto Bermúdez Cella · Leidy Carolina Sandoval Espinel
John Jairo Sandoval Espinel · Andres David Barrera Herrera
Andrés Felipe Alarcón Bonilla · Andrea Gómez Fernández
Ana Jazmin Rodriguez Lara · Natalia Urrea González
Lady Alejandra Barrera Chaparro



Uptc[®]

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia

VIGILADA MINEUCACIÓN



EXPLORANDO LA EVOLUCIÓN
GEOLÓGICA DE ZONAS DEFORMADAS EN LA
CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA
MEDIANTE
MODELADO **TERMOCINEMÁTICO 3D**

Mauricio Alberto Bermúdez Cella · Leidy Carolina Sandoval Espinel
John Jairo Sandoval Espinel · Andres David Barrera Herrera
Andrés Felipe Alarcón Bonilla · Andrea Gómez Fernández
Ana Jazmin Rodriguez Lara · Natalia Urrea González
Lady Alejandra Barrera Chaparro



Enfoque: Investigación
Área OCDE: Ingeniería y Tecnología
Disciplina: Ingeniería ambiental y geológica
Colección N°. 337

Explorando la evolución geológica de zonas deformadas en la Cordillera Oriental de Colombia mediante modelado termocinématico 3D
Exploring the geological evolution of deformed zones in the Colombian Eastern Cordillera using 3D thermokinematic modeling

Primera Edición, 2026
Versión digital

© Bermudez Cella Mauricio, 2026
© Sandoval Espinel Leidy Carolina, 2026
© Sandoval Espinel John, 2026
© Barrera Herrera Andrés, 2026
© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2026

© Gómez Fernández Andrea, 2026
© Rodríguez Lara Ana Jazmín, 2026
© Urrea González Natalia, 2026
© Barrera Chaparro Lady Alejandra, 2026
© Alarcón Bonilla Andrés, 2026

ISBN (ePub) 978-628-7863-20-0

Proceso de arbitraje doble ciego
Recepción: junio 2024
Aprobación: marzo 2025

Hecho en Colombia - Made in Colombia

Explorando la evolución geológica de zonas deformadas en la Cordillera Oriental de Colombia mediante modelado termocinématico 3D /Exploring the geological evolution of deformed zones in the Colombian Eastern Cordillera using 3D thermokinematic modeling/ Bermúdez Cella, Mauricio; Sandoval Espinel, Carolina; Sandoval Espinel, John; Barrera Herrera, Andrés; Alarcón Bonilla, Andrés; Gómez Fernández, Andrea; Rodríguez Lara, Ana; Urrea González, Natalia; Barrera Chaparro, Alejandra, Tunja: Editorial UPTC, 2026, 205 p.

ISBN (ePub) 978-628-7863-20-0

Incluye referencias bibliográficas

1. Modelado Termocinématico. 2. Evolución Geológica. 3. Termocronología. 4. Cuencas sedimentarias. 5. Modelos directos. 6. Pecube. 7. Exhumación.

(Dewey 620/21) (RBGD - Procesos geológicos de la superficie de la Tierra)

Rector, UPTC

Enrique Vera López

Comité Editorial

Carlos Mauricio Moreno Téllez

Vicerrector de Investigación y Extensión

Yolanda Torres Pérez

Directora de Investigaciones

Óscar Pulido Cortés

Delegado Vicerrectoría Académica

Martín Orlando Pulido Medellín

Representante Área Ciencias Agrícolas

Yolima Bolívar Suárez

Representante Área Ciencias Médicas y de la Salud

Nelsy Rocío González Gutiérrez

Representante Área Ciencias Naturales

Olga Yanet Acuña Rodríguez

Representante Área Ciencias Sociales

Juan Guillermo Díaz Bernal

Representante Área Humanidades

Pilar Jovanna Holguín Tovar

Representante Área Artes

Edgar Nelson López López

Representante Área Ingeniería y Tecnología

Juan Sebastián González Sanabria

Representante Grupos de Investigación

Editora

Bertha Ramos Holguín

Corrección de Estilo

Juan Carlos Álvarez Ayala

Diseño y Diagramación

Aura Patricia Sarmiento Hernández

Libro de investigación resultado del proyecto Aplicación de modelado inverso termocinémico 3D, métodos bayesianos y data mining usando computación paralela de alto rendimiento (HPC) para el análisis de cuencas petrolíferas en Colombia. Código SGI No. 3602

Citar este libro / Cite this book

Bermúdez Cella, M.A., Sandoval Espinel, L. C., Sandoval Espinel, J., Barrera Herrera, A., Alarcón Bonilla, A. F., Gómez Fernández, A., Rodríguez Lara, A. J., Urrea González, N. y Barrera Chaparro, L. A. (2026). *Explorando la evolución geológica de zonas deformadas en la Cordillera Oriental de Colombia mediante modelado termocinémico 3D*. Editorial UPTC. <https://doi.org/10.19053/uptc.9786287863200>



Libro financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Dirección de Investigaciones de la UPTC. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 de 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Editorial UPTC

La Colina, Bloque 7, Casa 5
Avenida Central del Norte No. 39-115, Tunja, Boyacá
comite.editorial@uptc.edu.co
<https://editorial.uptc.edu.co>

Resumen

El propósito de este libro es analizar las principales cuencas sedimentarias en Colombia (Valle Medio del Magdalena, Cordillera Oriental, Llanos y Caguán Putumayo) a través del modelado numérico termocinemático 3D. Esto permite establecer diferencias entre ellas en términos de estructura termal, la influencia de zonas de fallas y pulsos de exhumación que pudieron haber invertido las cuencas.

Esta obra está dividida en cuatro capítulos conformados de la siguiente manera: en el primer capítulo se describen las características geológicas más importantes en las zonas de estudio y su evolución a través del tiempo. Seguidamente, en el segundo capítulo se abordan los conceptos esenciales de la termocronología, los distintos métodos de datación y la interpretación de éstos en términos de historias termales. El tercer capítulo, se enfoca en la metodología necesaria para generar los resultados de este estudio. En el cuarto capítulo se muestran los resultados, incluyendo la comparación entre las edades predichas por el modelo y las medidas por los diferentes métodos termocronométricos. Finalmente, se discuten los resultados obtenidos para cada una de las áreas analizadas.

Este libro representa el primer esfuerzo por mostrar las fortalezas y aplicaciones de los modelos numéricos termocinemáticos 3D en Colombia. El libro familiariza al lector con las principales cuencas en Colombia. También, le permite discernir sobre el empleo de bases de datos de edades termocronológicas para entender los procesos de evolución de las cuencas. Así mismo, orienta al lector en el empleo de modelos termocinemáticos para el estudio de un área en particular.

Además, el lector tendrá la posibilidad de utilizar una versión del código que facilita la realización de múltiples modelos numéricos termocinemáticos directos en el menor tiempo posible, gracias a las herramientas desarrolladas en esta investigación. Finalmente, se muestra que los modelos directos logran discriminar los primeros pulsos de exhumación detectados para las distintas áreas analizadas. Igualmente, se evidencian las diferencias entre los parámetros termales generados por los modelos en cada cuenca, esto debido, posiblemente a la presencia de fenómenos locales, como por ejemplo, alteraciones hidrotermales y/o acción de fallas locales.

Palabras clave: Código PeCube, Termocronología, Modelamiento Termocinemático, Métodos de datación, Historias termales, Geología, Cuencas Colombianas, Cuenca Llanos, Cuenca Valle Medio del Magdalena, Cuenca Cordillera Oriental, Cuenca Caguán Putumayo, Exhumación, Parámetros termales, Trazas de fisión, (U-Th)/He.

Abstract

The purpose of this book is to analyze the main sedimentary basins in Colombia (Middle Magdalena Valley, Eastern Cordillera, Llanos, and Caguán Putumayo) through 3D thermokinematic numerical modeling. This allows for establishing differences between them in terms of thermal structure, the influence of fault zones, and exhumation pulses that may have inverted the basins.

This work is divided into five chapters as follows: the first chapter describes the most important geological features in the study areas and their evolution over time. Next, the second chapter addresses the essential concepts of thermochronology, the different dating methods, and their interpretation in terms of thermal histories. The third chapter focuses on the methodology necessary to generate the results of this study. The fourth chapter presents the results, including a comparison between the ages predicted by the model and those measured by different thermochronometric methods. Finally, the results obtained for each analyzed area are discussed.

This book represents the first effort to showcase the strengths and applications of 3D thermokinematic numerical models in Colombia. The book familiarizes the reader with the main basins in Colombia. It also allows them to understand the use of thermochronological age databases to comprehend basin evolution processes. Additionally, it guides the reader on using thermokinematic models for studying a particular area. Furthermore, the reader will have the opportunity to use a version of the code that facilitates conducting multiple direct thermokinematic

numerical models in the shortest possible time, thanks to the tools developed in this research. Finally, it is demonstrated that direct models can discriminate the initial exhumation pulses detected for the different analyzed areas. Differences between the thermal parameters generated by the models in each basin are also evidenced, possibly due to the presence of local phenomena such as hydrothermal alterations and/or the action of local faults.

Keywords: PeCube Code, Thermochronology, Thermokinematic Modeling, Dating Methods, Thermal Histories, Geology, Colombian Basins, Llanos Basin, Middle Magdalena Valley Basin, Eastern Cordillera Basin, Caguán Putumayo Basin, Exhumation, Thermal Parameters, Fission Tracks, (U-Th)/He.

Contenido

Prólogo	25
CAPITULO 1.	
Principales zonas de deformación analizadas	29
1.1 Piedemonte llanero (límite con la cuenca Llanos).....	29
1.1.1 Litoestratigrafía regional.....	31
1.1.2 Geología estructural.....	34
1.1.3 Evolución tectónica.....	37
1.2 Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Valle Medio del Magdalena).....	40
1.2.1 Litoestratigrafía regional.....	41
1.2.2 Geología estructural.....	47
1.2.3 Evolución tectónica.....	51
1.3 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental.....	53
1.3.1 Litoestratigrafía regional.....	54
1.3.2 Geología estructural.....	63
1.3.3 Evolución tectónica.....	67
1.4 Piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Caguán-Putumayo).....	69
1.4.1 Litoestratigrafía regional.....	70
1.4.2 Geología estructural.....	75
1.4.3 Evolución tectónica.....	78
CAPITULO 2.	
Termocronología	81
2.1 Principios de termocronología.....	81
2.2 Tipos de muestreo.....	83

2.3 Trazas de fisión mediante uso del Detector Externo.....	84
2.4 Trazas de fisión mediante espectrometría de masas (LA-ICP-MS).....	86
2.5 Termocronología (U-Th)/He.....	87
2.6 De historias termales a estimación de tasas de erosión.....	88
2.7 Software Pecube.....	91
CAPÍTULO 3.	
Metodología.....	93
3.1 Recopilación de información.....	93
3.1.1 Geología de superficie.....	94
3.1.2 Datos de termocronología.....	94
3.1.3 Modelo digital de elevación.....	97
3.2 Selección de áreas de estudio.....	106
3.2.1 Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Valle Medio del Magdalena).....	106
3.2.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental.....	106
3.2.3 Piedemonte oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Llanos).....	108
3.2.4 Piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límites con la cuenca Caguán-Putumayo).....	109
3.3 Optimización de las corridas de los modelos directos.....	109
3.4 Estructuración de los datos de entrada.....	115
3.4.1 Matriz de edades.....	116
3.4.2 Establecimiento de parámetros fijos y variables.....	117
3.5 Compilación y verificación de los datos de salida.....	131
3.6 Interpretación y análisis de datos de salida.....	132
CAPÍTULO 4.	
Análisis de resultados.....	133
4.1 Edades predichas vs. edades medidas.....	135
4.1.1 Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Valle Medio del Magdalena).....	135
4.1.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental.....	137
4.1.3 Piedemonte oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Llanos).....	141
4.1.4 Piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Caguán-Putumayo).....	142
4.2 Modelos de velocidad.....	144



4.2.1 Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Valle Medio del Magdalena).....	144
4.2.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental.....	146
4.2.3 Piedemonte llanero (límite con la cuenca Llanos).....	149
4.2.4 Piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límites con la cuenca Caguán-Putumayo).....	150
4.3 Modelos de temperatura.....	152
4.3.1 Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Valle Medio del Magdalena).....	152
4.3.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental.....	153
4.3.3 Piedemonte llanero (límite con la cuenca Llanos).....	155
4.3.4 Piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Caguán-Putumayo).....	156
Discusión.....	159
Conclusiones.....	167
Referencias.....	169
Anexos.....	197
Semblanza de los autores.....	199

Lista de figuras

Figura 1. Mapa geológico de la cuenca Llanos, elaborado a partir de las planchas 1:100000 del SGC.....	30
Figura 2. Carta cronoestratigráfica desde el Jurásico inferior al Cenozoico para la Cordillera Oriental y las cuencas circundantes, Valle Medio del Magdalena y Llanos.	31
Figura 3. Principales estructuras observadas en el piedemonte llanero y parte este de la Cordillera Oriental.....	35
Figura 4. Mapa geológico de la cuenca VMM elaborado a partir de las planchas geológicas 1:100000 del SGC.....	41
Figura 5. Principales estructuras presentes en la zona de estudio al interior de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.....	48
Figura 6. Mapa geológico del Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental elaborado a partir de las planchas geológicas 1:100000 del SGC.....	53
Figura 7. Principales estructuras consideradas alrededor de la Cordillera Oriental.....	64
Figura 8. Mapa geológico de la cuenca Caguán-Putumayo, elaborado a partir de las planchas geológicas 1:100000, del Servicio Geológico Colombiano.....	69
Figura 9. Columnas estratigráficas sintetizadas de las subcuencas (A) Putumayo y (B) Caguán. Fuente: Modificado de Montenegro y Barragán (2011).....	70
Figura 10. Principales estructuras consideradas alrededor de la cuenca Caguán-Putumayo.....	76



Figura 11. Sistemas isotópicos y métodos geo-termo-cronológicos disponibles.....	82
Figura 12. Diferentes técnicas de muestreo dependiendo del objetivo de cada estudio. Tomado y modificado de Ehlers, (2005) y de Schildgen y van der Beek (2019).....	84
Figura 13. Historia tiempo-temperatura derivada de HeFTy (Ketcham, 2005) para una muestra hipotética.....	89
Figura 14. Transformación de datos termocronológicos a historias termales, denudación, levantamiento y evolución del paisaje. En elipses, los modelos y datos necesarios para generar cada modelo. Es necesario asumir una estrategia de muestreo y contar con otros datos geológicos. Fuente: Modificado de Bermúdez (2018).....	90
Figura 15. Configuración de un modelo Pecube hipotético, se proporciona temperatura en la base del modelo, temperatura superficial, campo de velocidades, topografía y la geometría de la falla a utilizar.....	92
Figura 16. Diagrama metodológico de trabajo.....	93
Figura 17. Modelo digital de elevación (DEM) para la cuenca Valle Medio del Magdalena, sector Sinclinal de Armas.....	98
Figura 18. Modelo digital de elevación (DEM) para el sector de Macanal - Santa María.....	100
Figura 19. Modelo digital de elevación (DEM) para el eje Axial (Macizo de Floresta) de la Cordillera Oriental.....	101
Figura 20. Modelo digital de elevación (DEM) para el sector de Bogotá - Villavicencio.....	102
Figura 21. Modelo digital de elevación (DEM) para el sector Sinclinal de Nunchía.....	103
Figura 22. Modelo digital de elevación (DEM) para la cuenca Caguán Putumayo en el Bloque Este modelado.....	104
Figura 23. Modelo digital de elevación (DEM) para la cuenca Caguán-Putumayo en el Bloque Oeste modelado.....	105
Figura 24. Matriz de parámetros fijos y variables realizada para correr Pecube.....	110

Figura 25. Modelo programado en Bash.....	114
Figura 26. Edades termocronológicas disponibles a lo largo del Eje Axial de la Cordillera Oriental.	121
Figura 27. Edades termocronológicas disponibles a lo largo del piedemonte oriental y límites con la cuenca Llanos.....	126
Figura 28. Edades termocronológicas disponibles a lo largo del Macizo de Garzón, cuenca Putumayo y sur de la Cordillera Oriental. Fuente: Tomado de Sandoval-Espinel et al. (2025).....	129
Figura 29. Comparación de edades medidas y predichas por el método AFT.....	136
Figura 30. Comparación de edades medidas y predichas para diferentes métodos de datación a diferentes alturas en la zona Macanal - Santa María.....	138
Figura 31. Comparación de edades medidas y predichas para diferentes métodos de datación a diferentes alturas en la zona Bogotá - Villavicencio.....	139
Figura 32. Comparación de edades medidas y predichas para diferentes métodos de datación a diferentes alturas en la zona Macizo de Floresta.....	141
Figura 33. Comparación de edades medidas y predichas para diferentes métodos de datación a diferentes alturas en el Sinclinal de Nunchía.....	142
Figura 34. Comparación de edades medidas y predichas a diferentes alturas en el Bloque Este de la cuenca Caguán-Putumayo.....	143
Figura 35. Comparación de edades medidas y predichas para diferentes métodos de datación a diferentes alturas en el Bloque Oeste de la cuenca Caguán-Putumayo.....	144
Figura 36. Modelo 3D de velocidades área Sinclinal de Armas.....	145
Figura 37. Modelo 3D de velocidades área Sinclinal de Santa María – Macanal.....	146
Figura 38. Modelo 3D de velocidades área Bogotá – Villavicencio.....	147
Figura 39. Modelo 3D de velocidades área sector axial Macizo de Floresta.....	148
Figura 40. Modelo 3D de velocidades área Sinclinal de Nunchía.....	149



Figura 41. Modelo 3D de velocidades área Bloque Este de la cuenca Caguán–Putumayo.....	151
Figura 42. Modelo 3D de velocidades área Bloque Oeste.....	152
Figura 43. Modelo de temperatura 3D área Sinclinal de Armas.....	153
Figura 44. Modelo de temperatura 3D área Macanal - Santa María.....	153
Figura 45. Modelo de temperatura 3D área Bogotá - Villavicencio.....	154
Figura 46. Modelo de temperatura 3D área Macizo de Floresta.....	155
Figura 47. Modelo de temperatura 3D área Sinclinal de Nunchía.....	155
Figura 48. Modelo de temperatura 3D área Bloque Este.....	156
Figura 49. Modelo de temperatura 3D área Bloque Oeste de la cuenca Caguán–Putumayo.....	157

Lista de Tablas

Tabla 1. Principales elementos estructurales y fallas presentes en la cuenca Llanos.	37
Tabla 2. Principales fallas existentes en el piedemonte y en la cuenca Valle Medio del Magdalena.....	50
Tabla 3. Principales fallas existentes en los sectores de la Cordillera Oriental considerados.....	66
Tabla 4. Principales fallas presentes en la cuenca Caguán-Putumayo.....	77
Tabla 5. Sistemas termocronológicos y temperaturas de cierre asociadas.....	83
Tabla 6. Características del modelo digital de elevación para la cuenca Valle Medio del Magdalena en el sector Sinclinal de Armas.....	98
Tabla 7. Características del modelo digital de elevación para el sector Macanal - Santa María.....	99
Tabla 8. Características del modelo digital de elevación para el Eje Axial (Macizo de Floresta) de la Cordillera Oriental.....	100
Tabla 9. Características del modelo digital de elevación para el sector Bogotá - Villavicencio.....	101
Tabla 10. Características del modelo digital de elevación para el sector del Sinclinal de Nunchía.....	102
Tabla 11. Características de los modelos digitales de elevación para la cuenca Caguán-Putumayo de los dos bloques (Este-Oeste) modelados.....	104
Tabla 12. Estructura del encabezado para las matrices de edades para cada una de las zonas de estudio.....	116



Tabla 13. Características de la matriz de edades para la cuenca Valle Medio del Magdalena.....	117
Tabla 14. Parámetros fijos establecidos para el sector Sinclinal de Armas, de la cuenca Valle Medio del Magdalena.....	118
Tabla 15. Parámetros variables establecidos para el sector Sinclinal de Armas, de la cuenca Valle Medio del Magdalena.....	118
Tabla 16. Características de las matrices de edades para la cuenca Cordillera Oriental.....	119
Tabla 17. Parámetros establecidos para el sector Macanal - Santa María de la cuenca Cordillera Oriental.....	122
Tabla 18. Parámetros variables establecidos para el sector Macanal – Santa María, de la cuenca Cordillera Oriental.....	122
Tabla 19. Parámetros fijos establecidos para el sector axial (Macizo de Floresta) de la cuenca Cordillera Oriental.....	123
Tabla 20. Parámetros variables para el sector axial (Macizo de Floresta) de la cuenca Cordillera Oriental.....	123
Tabla 21. Parámetros fijos establecidos para el sector Bogotá - Villavicencio, de la cuenca Cordillera Oriental.....	124
Tabla 22. Parámetros variables establecidos para el sector Bogotá - Villavicencio, de la cuenca Cordillera Oriental.....	124
Tabla 23. Características de las matrices de edades para la zona piedemonte oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Llanos).....	125
Tabla 24. Parámetros fijos establecidos para el sector Sinclinal de Nunchía, de la cuenca Llanos.....	126
Tabla 25. Parámetros variables establecidos para el Sinclinal de Nunchía, de la cuenca Llanos.....	127
Tabla 26. Características de las matrices de edades para la zona piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Caguán-Putumayo).....	128
Tabla 27. Parámetros fijos establecidos para el Bloque Este de la cuenca Caguán-Putumayo.....	129

Tabla 28. Parámetros variables establecidos para el Bloque Este de la cuenca Caguán-Putumayo.....	130
Tabla 29. Parámetros fijos establecidos para el Bloque Oeste de la cuenca Caguán-Putumayo.....	130
Tabla 30. Parámetros variables establecidos para el Bloque Oeste de la cuenca Caguán-Putumayo.....	131
Tabla 31. Resultados de rangos misfit de las mejores corridas para las zonas de estudio.....	133
Tabla 32. Parámetros resultantes de los mejores modelos considerados en las diferentes zonas de estudio.....	134
Tabla 33. Valores de velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla La Salina.....	145
Tabla 34. Valores de velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla de Tesalia.....	146
Tabla 35. Valores de velocidad de exhumación para el Bloque Oeste de la falla Las Mercedes.....	147
Tabla 36. Valores de velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla de Boyacá.....	148
Tabla 37. Valores de la velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla Yopal.....	149
Tabla 38. Valor en la velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla del borde amazónico.....	150
Tabla 39. Valores para la velocidad de exhumación del Bloque Este de la falla Resinas.....	151



Abreviaturas

SGC Servicio Geológico Colombiano

ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos

ZHe Datación por el método Uranio-Torio-Helio (U-Th)/He en circón

AFT Datación por el método de trazas de fisión en apatitos

AHe Datación por el método Uranio-Torio-Helio (U-Th)/He en apatito

ZFT Datación por el método de trazas de fisión en circón

PAZ Zona de borrado parcial o “Partial Annealing Zone”

PRZ Zona de retención parcial o “Partial Retention Zone”

ICP Instituto Colombiano del Petróleo

SHP Shape File

HPC High-Performance Computing

Km Kilómetros

Agradecimientos

A Minciencias y a la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) por la financiación otorgada al proyecto titulado Aplicación de modelamiento termocinético inverso 3D, métodos bayesianos y minería de datos utilizando computación paralela de alto rendimiento (HPC) para el análisis de cuencas petroleras en Colombia (CT: 80740-038-2023, código: 110993194496).



Prólogo

El estudio de las cuencas sedimentarias desempeña un papel fundamental en la comprensión de la evolución geológica y la distribución de recursos naturales. En este contexto, la modelización tectotérmica del subsuelo, de forma bidimensional y tridimensional, se ha convertido en una herramienta esencial para la exploración de hidrocarburos y minerales, y para la comprensión de la historia deformacional de una región. Sin embargo, el acceso a información o datos geotermocronológicos de cuencas petrolíferas es limitado y, generalmente, de carácter confidencial, debido a que pertenecen a empresas petroleras. Por este motivo, en la presente investigación se analizan sectores situados entre piedemontes y cuencas, es decir, en el límite de la cuenca que sufre deformación. Este estudio se centra en la aplicación del modelamiento directo con el *software* Pecube (Braun, 2003; Braun et al., 2012), el cual permite predecir la exhumación de un sector específico y, por ende, las edades termocronológicas en función de parámetros termales y flexurales. Mediante este código se investigó la evolución térmica de varios sectores de la Cordillera Oriental, específicamente, los piedemontes que limitan con las cuencas Valle Medio del Magdalena, Llanos y Caguán-Putumayo. Pecube permite resolver la ecuación de producción, difusión y advección del calor en el subsuelo, proporcionando información crucial sobre las condiciones térmicas a lo largo del tiempo. Esta investigación busca analizar cómo la exhumación registrada en las zonas de deformación

se relacionaría con los procesos de depositación y transformación de los sedimentos en las cuencas respectivas, proporcionando así una comprensión más profunda de su historia y potencial geológico.

Pese a los avances tecnológicos y el conocimiento de las cuencas sedimentarias de Colombia, el desafío sigue siendo integrar diferentes disciplinas científicas en un flujo de trabajo coherente. Esto permitirá hacer un modelado directo y explorar una gama más amplia de escenarios geológicos posibles. La identificación de episodios de exhumación es clave para entender la relación que posee el orógeno con su cuenca respectiva. La computación paralela de alto rendimiento (HPC) es fundamental para abordar y resolver problemas complejos en diversas áreas de estudio. Su aplicación en la modelación termocinemática 3D permite una exploración detallada y eficiente del universo de parámetros termales y flexurales, lo que resulta determinante para comprender la evolución tectonotermal de las zonas deformadas analizadas. Al comparar modelos termocronológicos sintéticos con datos existentes, se pueden identificar patrones y procesos geológicos claves, que permitirían refinar nuestra interpretación de la historia geológica de una región.

La integración de datos geocronológicos y termocronológicos con datos de geología estructural, tectónica, geomorfología, estratigrafía, sedimentología y sísmica es fundamental en la exploración petrolífera y minera, ya que proporcionan una comprensión más profunda de la evolución tectonotermal de zonas deformadas. Estos métodos pueden revelar la historia termal de una región, lo cual es esencial para evaluar la madurez de la roca madre y el potencial de las trampas de hidrocarburos o los mecanismos de formación de minerales con fines económicos. A pesar de su complejidad, el uso de estos métodos puede disminuir significativamente el riesgo en la exploración, considerando la ocurrencia de eventos paleotermales que han afectado la zona de interés.

La integración de estos métodos se obtuvo con el modelamiento numérico directo termocinemático a través del *software* Pecube, con diferentes configuraciones de ejecución por medio de *scripts* de Python



y de Bash en Cygwin. Estas configuraciones no solo optimizaron la recolección de datos, sino que facilitaron la interpretación de caminos tiempo-temperatura. Lo anterior, permitió la aceleración del proceso de obtención de variables de salida, en donde se obtuvo cuantitativamente la edad de cada muestra que atravesó una temperatura determinada. Esto permite definir procesos termotectónicos en las áreas objeto de estudio, integrando métodos de evolución espacio-temporal.

Estos procesos termotectónicos son visualizados en 3D mediante herramientas avanzadas como el *software* MayaVi. Además, se llevó a cabo un análisis comparativo de edades estimadas y observadas en las diferentes zonas de estudio para obtener los mejores ajustes (o “misfit”) de estos datos y evaluar la precisión de los modelos. Esta metodología no solo mejora la precisión de nuestras predicciones, sino que también enriquece la comprensión del registro geológico, permitiendo correlaciones más efectivas con estudios previos. Así, se valida el trabajo integral de investigación y se fomenta la generación de nuevo conocimiento científico sobre la evolución geológica de Colombia.

Debido al reciente aumento de trabajos de termocronología y la generación de nueva información geológica, y el incremento en el uso de métodos de termocronología cuantitativa se seleccionaron cuatro (4) zonas de deformación en los alrededores del Valle Medio del Magdalena, Cordillera Oriental, Llanos y Caguán-Putumayo, para tratar de entender la deformación y la relación con la exhumación de tales zonas. Para lograr esto, se ha dividido la presente obra en cuatro capítulos: en el primer capítulo se hace un resumen de la información geológica existente a lo largo de las principales zonas de deformación antes mencionadas y las cuencas que lo limitan. El segundo capítulo aborda brevemente conceptos asociados a la termocronología, termocronología cuantitativa y el código Pecube, con la finalidad de familiarizar al lector con este tópico. El tercer capítulo aborda la metodología empleada en la presente obra, la selección de las diferentes áreas de estudio y la selección de los mejores modelos directos. Finalmente, en el cuarto capítulo, se presentan los resultados y los respectivos análisis para cada una de las zonas evaluadas en la presente investigación.

Esta obra es resultado del financiamiento proporcionado por MINCIENCIAS-ANH a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), bajo el contrato número 80470-038-2023, código 110993194496, titulado “Aplicación de modelado inverso termocinémico 3D, métodos bayesianos y data mining usando computación paralela de alto rendimiento (HPC) para el análisis de cuencas petrolíferas en Colombia”. El autor AFAB agradece al Fondo Corrigan, gestionado por la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos de la Energía (ACGGP), por haber financiado parcialmente esta obra. Finalmente, agradecemos a dos evaluadores anónimos y al Comité Editorial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), por la revisión detallada de la presente obra.

