

**MODELAMIENTO DE LA DEFORMACIÓN DE LA SUBDUCCIÓN DE LAS
PLACAS NAZCA Y SURAMERICANA EN COLOMBIA DURANTE LA ERA
CENOZOICA**

ANGELA MELISA CALLEJAS GARCÉS

20141032071

GERMÁN DAVID HERNÁNDEZ ESTEPA

20132032147

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
BOGOTÁ D.C.**

2019

**MODELAMIENTO DE LA DEFORMACIÓN DE LA SUBDUCCIÓN DE LAS
PLACAS NAZCA Y SURAMERICANA EN COLOMBIA DURANTE LA ERA
CENOZOICA**

ANGELA MELISA CALLEJAS GARCÉS

20141032071

GERMÁN DAVID HERNÁNDEZ ESTEPA

20132032147

**MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
TOPOGRÁFICO**

DIRECTOR

PhD. ROBINSON QUINTANA PUENTES

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA**

BOGOTÁ D.C.

2019

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	3
OBJETIVOS.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos específicos.....	4
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
CAPÍTULO 2	7
MARCO TEÓRICO	7
Marco específico.....	7
Definiciones:.....	7
Corteza oceánica.....	8
Corteza Terrestre.	9
Dorsales Oceánicas.....	10
Lava.....	10
Placa Tectónica.....	10
Zona de Subducción.	11
Zona de Benioff.....	11
Deformación y tasa de deformación.....	11
Ecuación de Momentum.....	16
Marco referencial.....	25
CAPÍTULO 3	33
METODOLOGÍA.....	33
Diagrama de flujo, modelamiento.....	68

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
CONCLUSIONES.....	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Placas tectónicas a analizar, Nazca y Suramericana.	7
Ilustración 2. Borde Convergente.....	8
Ilustración 3. Astenosfera.	8
Ilustración 4. Corteza terrestre e interior de la Tierra.....	9
Ilustración 5. Deriva continental.	10
Ilustración 6. Esfuerzo actual de los Andes del Norte.....	26
Ilustración 7. Bloque de los Andes, escapando hacia el Noreste..	27
Ilustración 8. Croquis geológico mostrando las principales unidades que construyen los Andes Centrales.....	30
Ilustración 9 .Entorno tectónico placa de Nazca y Suramericana.	32
Ilustración 10. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.....	33
Ilustración 11. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.....	34
Ilustración 12. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.....	34
Ilustración 13. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.....	35
Ilustración 14. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.....	35

Índice de Tablas

Tabla 1. Convenciones para un análisis de mayor precisión.....	36
Tabla 2. Cálculos, análisis distancia (0.0045 Ma).....	37
Tabla 3. Cálculos, análisis elevación (0.0045 Ma).....	37
Tabla 4. Cálculos, análisis distancia (0.255 Ma).....	38

Tabla 5. Cálculos, análisis elevación (0.254 Ma).....	38
Tabla 6. Cálculos, análisis distancia (0.504 Ma).....	39
Tabla 7. Cálculos, análisis elevación (0.504 Ma).....	39
Tabla 8. Cálculos, análisis distancia (0.753 Ma).....	40
Tabla 9. Cálculos, análisis elevación (0.753 Ma).....	40
Tabla 10. Cálculos, análisis distancia (1.002 Ma).....	41
Tabla 11. Cálculos, análisis elevación (1.002 Ma).....	41
Tabla 12. Cálculos, análisis distancia (1.255 Ma).....	42
Tabla 13. Cálculos, análisis elevación (1.255 Ma).....	42
Tabla 14. Cálculos, análisis distancia (1.504 Ma).....	43
Tabla 15. Cálculos, análisis elevación (1.504 Ma).....	43
Tabla 16. Cálculos, análisis distancia (1.753 Ma).....	44
Tabla 17. Cálculos, análisis elevación (1.753 Ma).....	44
Tabla 18. Cálculos, análisis distancia (2.002 Ma).....	45
Tabla 19. Cálculos, análisis elevación (2.002 Ma).....	45
Tabla 20. Cálculos, análisis distancia (2.254 Ma).....	46
Tabla 21. Cálculos, análisis elevación (2.254 Ma).....	46
Tabla 22. Cálculos, análisis distancia (2.502 Ma).....	47
Tabla 23. Cálculos, análisis elevación (2.502 Ma).....	47
Tabla 24. Cálculos, análisis distancia (2.756 Ma).....	48
Tabla 25. Cálculos, análisis elevación (2.756 Ma).....	48
Tabla 26. Cálculos, análisis distancia (3.001 Ma).....	49
Tabla 27. Cálculos, análisis elevación (3.001 Ma).....	49
Tabla 28. Cálculos, análisis distancia (3.254 Ma).....	50
Tabla 29. Cálculos, análisis elevación (3.254 Ma).....	50
Tabla 30. Cálculos, análisis distancia (3.502 Ma).....	51
Tabla 31. Cálculos, análisis elevación (3.502 Ma).....	51
Tabla 32. Cálculos, análisis distancia (3.754 Ma).....	52
Tabla 33. Cálculos, análisis elevación (3.754 Ma).....	52
Tabla 34. Cálculos, análisis distancia (4.003 Ma).....	53
Tabla 35. Cálculos, análisis elevación (4.003 Ma).....	53

Tabla 36. Cálculos, análisis distancia (4.256 Ma).....	54
Tabla 37. Cálculos, análisis elevación (4.256 Ma).....	54
Tabla 38. Cálculos, análisis distancia (4.500 Ma).....	55
Tabla 39. Cálculos, análisis elevación (4.500 Ma).....	55
Tabla 40. Cálculos, análisis distancia (4.754 Ma).....	56
Tabla 41. Cálculo, análisis elevación (4.754 Ma)	56
Tabla 42. Cálculos, análisis distancia (5.003 Ma).....	57
Tabla 43. Cálculos, análisis elevación (5.003 Ma).....	57
Tabla 44. Cálculos, análisis distancia (5.252 Ma).....	58
Tabla 45. Cálculos, análisis elevación (5.252 Ma).....	58
Tabla 46. Cálculos, análisis distancia (5.502 Ma).....	59
Tabla 47. Cálculos, análisis elevación (5.502 Ma).....	59
Tabla 48. Cálculos, análisis distancia (5.752 Ma).....	60
Tabla 49. Cálculos, análisis elevación (5.752 Ma).....	60
Tabla 50. Cálculos, análisis distancia (6.002 Ma).....	61
Tabla 51. Cálculos, análisis elevación (6.002 Ma).....	61
Tabla 52. Cálculos, análisis distancia (6.255 Ma).....	62
Tabla 53. Cálculos, análisis elevación (6.255 Ma).....	62
Tabla 54. Cálculo, análisis distancia (6.506 Ma)	63
Tabla 55. Cálculo, análisis elevación (6.506 Ma)	63
Tabla 56. Cálculos, análisis distancia (6.753 Ma).....	64
Tabla 57. Cálculos, análisis elevación (6.753 Ma).....	64
Tabla 58. Cálculos, análisis distancia (7.000 Ma).....	65
Tabla 59. Cálculos, análisis elevación (7.000 Ma).....	65
Tabla 60. Cálculos, análisis distancia (7.250 Ma).....	66
Tabla 61. Cálculos, análisis elevación (7.250 Ma).....	66
Tabla 62. Cálculos, análisis distancia (7.457 Ma).....	67
Tabla 63. Cálculos, análisis elevación (7.457 Ma).....	67

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de deformación.....	11
Ecuación 2. Cálculo para una deformación compleja	11
Ecuación 3. Componente x del tensor en 3D.....	12
Ecuación 4. Componente y del tensor en 3D.....	12
Ecuación 5. Componente z del tensor en 3D.....	12
Ecuación 6. Componente de deformación en xy	12
Ecuación 7. Componente de deformación en xz	12
Ecuación 8. Componente de deformación en yz	12
Ecuación 9. Ecuación de velocidad	13
Ecuación 10. Velocidad de deformación en x	13
Ecuación 11. Velocidad de deformación en y	13
Ecuación 12. Velocidad de deformación en z	13
Ecuación 13. Definición de los gradientes espaciales	14
Ecuación 14. Componente x, tasa de deformación.....	14
Ecuación 15. Componente y, tasa de deformación.....	14
Ecuación 16. Ecuación componente z, tasa de deformación.....	14
Ecuación 17. Componente tasa de deformación xy, yx.....	14
Ecuación 18. Componente tasa de deformación xz, zx	14
Ecuación 19. Componente tasa de deformación yz, zy	15
Ecuación 20. Ecuación de la forma simétrica de la tasa de tensor de deformación.	15
Ecuación 21. Ecuación componente isotrópico.....	15
Ecuación 22. Ecuación componente desviador	16
Ecuación 23. Ecuación suma de componentes de velocidad de deformación desviadora normal.....	16
Ecuación 24. Ecuación de tensor de velocidad de deformación desviada.....	16
Ecuación 25. Ecuación de momentum forma Euleriana.....	16
Ecuación 26. Ecuación de momentum forma Lagrangiana.....	17

Ecuación 27. Ecuación segunda ley de movimiento de Newton.....	17
Ecuación 28. Ecuación vectorial, segunda ley de movimiento de Newton.....	17
Ecuación 29. Ecuación segunda ley de movimiento de Newton en x	17
Ecuación 30. Ecuación segunda ley de movimiento de Newton en y	17
Ecuación 31. Ecuación segunda ley de movimiento de Newton en z	17
Ecuación 32. Ecuación de la fuerza neta en dirección x en el volumen Lagrangiano.....	17
Ecuación 33. Ecuación fuerza en A.....	18
Ecuación 34. Ecuación fuerza en B.....	18
Ecuación 35. Ecuación fuerza en C	18
Ecuación 36. Ecuación fuerza en D.....	18
Ecuación 37. Ecuación fuerza en E	18
Ecuación 38. Ecuación fuerza en F	18
Ecuación 39. Ecuaciones segunda ley de movimiento de Newton para volumen Lagrangiano	18
Ecuación 40. Ecuación normalizada Volumen Lagrangiano.....	19
Ecuación 41. Ecuación de diferencias de esfuerzos 01	19
Ecuación 42. Ecuación de diferencias de esfuerzos 02	19
Ecuación 43. Ecuación de diferencias de esfuerzos 03	20
Ecuación 44. Ecuación de densidad	20
Ecuación 45. Diferencia de componente de esfuerzo en x	20
Ecuación 46. Diferencia de componente de esfuerzo en y.....	20
Ecuación 47. Diferencia de componente de esfuerzo en z	20
Ecuación 48. Ecuación Lagrangiana de momento x-01	21
Ecuación 49. Ecuación Lagrangiana de momento x-02	21
Ecuación 50. Ecuación ley de viscosidad.....	21
Ecuación 51. Esfuerzo desviador 01.....	22
Ecuación 52. Esfuerzo desviador 02.....	22
Ecuación 53. Ley de fricción viscosa	22
Ecuación 54. Conservación del impulso para un fluido en un campo de gravedad	22
Ecuación 55. Derivada del tiempo de Euler	23
Ecuación 56. Ecuación de Navier – Stokes para componente x.....	23

Ecuación 57. Ecuación de Navier – Stokes para componente y.....	23
Ecuación 58. Ecuación de Navier – Stokes para componente z.....	23
Ecuación 59. Ecuación de Stokes Flujo Lento	24
Ecuación 60. Ecuación de Stokes componente x	24
Ecuación 61. Ecuación de Stokes componente y	24
Ecuación 62. Ecuación de Stokes componente z.....	24
Ecuación 63. Ecuación de Stokes Simplificada.....	24

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La subducción es el descenso de la litosfera oceánica dentro de la astenosfera, en donde una subducción profunda ocurre si el ángulo de buzamiento es mayor de 38° y el material de astenosfera yace por encima de la placa; si una subducción es poco profunda, tiene ángulos menores a 28° y el término subduciendo se usa cuando las dos placas están en contacto y que el material de la astenosfera no las separa (MONSALVE, 1998).

Los Andes del Norte comprenden una extensa zona de deformación continental limitada por el cratón sudamericano al oriente y por las zonas de subducción de las placas de Nazca y Caribe, situadas paralelamente a las costas de Colombia. La energía producida por la convergencia entre estas tres placas, es transpasada a la zona de subducción del Pacífico colombiano y a lo largo de diversos sistemas de fallas activas, paralelos a los piedemontes de las tres cordilleras colombianas. Se destacan: el Sistema del Piedemonte Llanero en el límite entre la Cordillera Oriental y el Cratón, el Sistema del Valle del Magdalena entre las Cordilleras Central y Oriental, y el Sistema Romeral a lo largo del Valle del Cauca-Patía (entre las cordilleras Central y Occidental). Las fallas de estos sistemas, son generalmente inversas con buzamiento hacia la cordillera, excepto al SW de Colombia donde se observan fallas de alto ángulo de dirección NNE y movimiento lateral derecho. Este movimiento se amortigua progresivamente hacia el norte, donde domina el movimiento inverso. Al norte de Colombia se observa el bloque triangular de Maracaibo limitado por tres grandes fallas de rumbo: Oca de dirección EW, Santa Marta-Bucaramanga de dirección NNW y Boconó de azimut NE (paralela a los Andes de Mérida). La convergencia de Caribe y Suramérica genera extrusión de este bloque hacia fallas activas laterales izquierdas de direcciones NS, asociadas con la colisión del bloque de Panamá. (A.TABOADA, 1998).

Con la presente investigación, se pretende mostrar el modelamiento de la deformación de la subducción en Colombia y el análisis del mismo, teniendo en cuenta la convergencia de las placas Nazca y suramericana durante los primeros 7.5 millones de años en la era Cenozoica, contando con una base numérica, la cual considera ecuaciones de gran envergadura como:

la ecuación de tasa de deformación, ecuación de velocidad, ecuación de componente isotrópico, ecuación de momento, segunda ley de movimiento de Newton, ecuación de fuerza neta en el volumen Lagrangiano, ecuación de Navier-Stokes, entre otras.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la información de la deformación de las placas tectónicas en donde se encuentra el territorio colombiano es muy escasa, unas de las pocas que se encuentran sobre este tema, proviene de un trabajo realizado por la Universidad de los Andes la cual tiene por nombre “Sismotectónica de Colombia: Deformación continental activa y subducción” (A. Taborda, 1998) en donde se describe el comportamiento de las placas Nazca, Caribe y parte de la placa de Suramérica, además, se analiza el movimiento y describen la formación de relieves dentro del territorio nacional, las demás informaciones encontradas fueron consultadas en revistas científicas y los artículos llevan los nombres de: Evolution of the stress and strain fields In the Eastern Cordillera Colombia (Obi Egbue, James Kellog, Hector Aguirre, Carolina Torres, Journal of Structural Geology, Strain Budget of the Ecuador-Colombia Subduction Zone: a stochastic view (B. Gambert, Z. Duputel, R. Jolivert, M. Simons, J. Jiang, EJ. Fielding, L. Rivera) de Earth and Planetary Science Letters.

Debido a la escasa información, la presente investigación tiene como finalidad contribuir a la generación de información y al análisis del comportamiento de la deformación de las placas tectónicas de Nazca y Suramericana en Colombia durante la era Cenozoica, donde se hace el análisis del modelamiento obtenido por el software Matlab, el cual aplica las ecuaciones referenciadas en el marco teórico específico, en donde se examinan los primeros 7.5 Ma de la era cenozoica y gráficamente se demuestra el cambio que ocurre al pasar cada 0.25 Ma y se generan modelos bidimensionales y tridimensionales, los cuales analizan a partir de la presión y la tensión, el comportamiento de la convergencia que ocurre dentro de la subducción en las placas mencionadas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Modelar la deformación de la subducción en Colombia a partir de unos datos base, teniendo en cuenta las placas tectónicas que convergen en el territorio enfatizando en la suramericana y la de Nazca.

Objetivos específicos

- Generar información que evidencie el comportamiento de las placas de Nazca y suramericana en los primeros 7.5 Ma de la era Cenozoica.
- Analizar de manera detallada los resultados obtenidos de la deformación de la subducción a partir del modelamiento generado por el software Matlab.
- Proporcionar información con relación al modelamiento de la deformación de la subducción en las placas Nazca y Suramericana en Colombia, para que sirva como base a futuras investigaciones enfocadas a los comportamientos topográficos y al área de las geociencias.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A Colombia la conforman las placas de Nazca, suramericana, Cocos y Caribe, también dos micro placas las cuales son la del bloque Chocó y la de Coiba. La sismicidad de Colombia es única, ya que el único caso en el mundo en donde se converge una placa principal subduce debajo de una continental a lo largo de una fosa de casi 6000 KM. (Monsalve-Mora, 2005). El indicio más importante de subducción, la distribución de los terremotos en profundidad que definen las distintas geometrías de subducción. La sismicidad de estas zonas depende de una serie de parámetros de las placas, y su geometría se relaciona con la edad y morfología de la litosfera en subducción, la velocidad de las placas y la historia tectónica de la placa superior (INGEOMINAS, 2005). La principal amenaza de sismo en Colombia es la zona de subducción en el límite activo entre las placas Nazca y Suramericana, cuyo borde recorre el fondo marino más o menos paralelo a la costa, esta fuente sísmica generó los terremotos más grandes que afectaron el país durante el siglo XX (1906 y 1979) con $M_w = 8.8$ y 8.1 respectivamente (INGEOMINAS, 2005)

El bloque Norte de los Andes, se encuentra delimitado por fallas borde oriental o frontal oriental y de Boconó al este, la fosa Colombo-ecuatoriana y Panamá al Oeste, y el cinturón deformado del Caribe Sur al Norte. En el sector norte de este bloque existen significantes desplazamientos que probablemente hayan ocurrido en las fallas de Oca y Santa Marta-Bucaramanga durante el Cenozoico, la primera en sentido lateral derecho y la segunda en sentido lateral izquierdo. Las fallas de Boconó, Santa Marta-Bucaramanga y el cinturón deformado del Caribe Sur, define el “Bloque de Maracaibo” el cual, se encuentra desplazado hacia el norte con relación a Suramérica desde finales del Paleógeno (Monsalve-Mora, 2005). Al generarse esos movimientos se van formando sismos. Los sismos ocurren por el contacto entre las placas oceánica y continental, son superficiales y predominantemente de carácter compresivo. La placa que subduce, se mueve con velocidad que sobrepasa la fuerza de fricción generada entre ella y la placa superior, creando una zona amplia de deformación donde se producen los sismos de mayor magnitud, debido a que la fuerza que se genera por el choque entre placas, al interior de la placa subducida, tiende a ocurrir un debilitamiento que también produce terremotos fuertes que contribuyen a la deformación interna de la

misma. A esta zona se le atribuyen varios eventos sísmicos de gran importancia, los cuales han causado mucho daño en el suroccidente colombiano como los ocurridos en 1991 y en el 2004 (Perez, 2014).

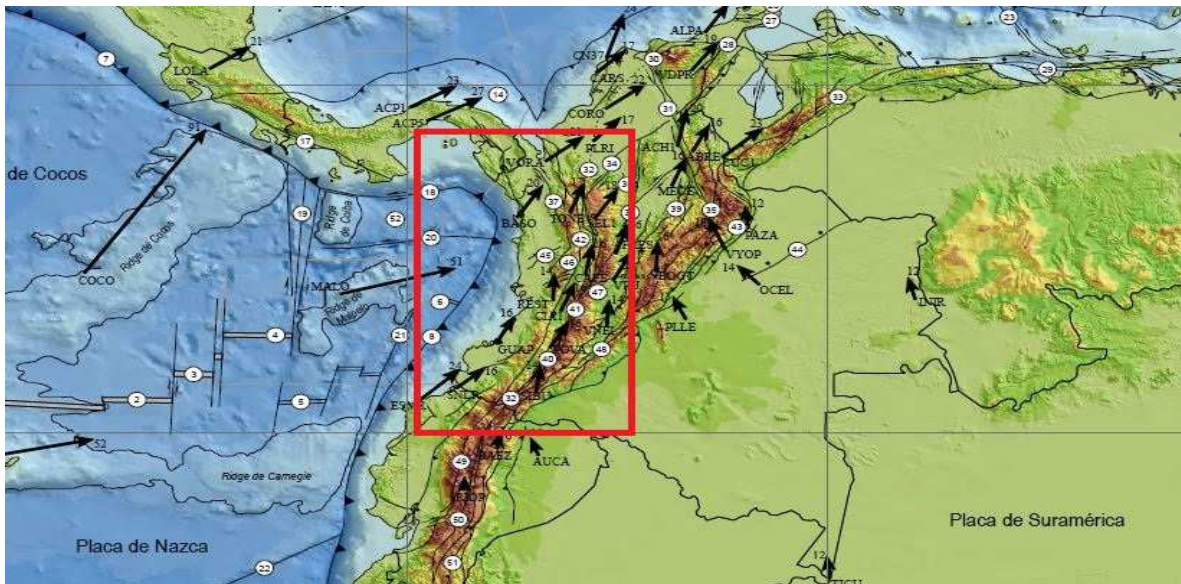
La poca información con la que cuenta el territorio colombiano en lo que compete a la deformación de la subducción de las placas tectónicas que convergen en él, es el principal problema de la presente investigación; además de ello, la manera en la que la deformación de la subducción está relacionada tan directamente con la topografía.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Marco específico

El Modelamiento se va enfocar en realizar el análisis de la deformación que se presenta en la placa Nasza y la suramericana entre los 0°N y los 10°N en el territorio colombiano



*Ilustración 1. Placas tectónicas a analizar, Nazca y Suramericana.
Fuente: Servicio Geológico Colombiano*

Definiciones:

Borde Convergente (Destructivo). Es el borde de choque de dos placas tectónicas. Una de las placas de la litosfera se hunde debajo de la otra consumiéndose en el manto. Este tipo de borde lleva la formación de cordilleras y está asociado con las zonas de actividad volcánica y sísmica originada por la fricción de dos placas existen tres tipos de bordes convergentes

- Convergencia entre dos placas de litosfera oceánica
- Convergencia entre una placa de litosfera oceánica y una continental
- Convergencia entre dos placas de litosfera continental (Romero)

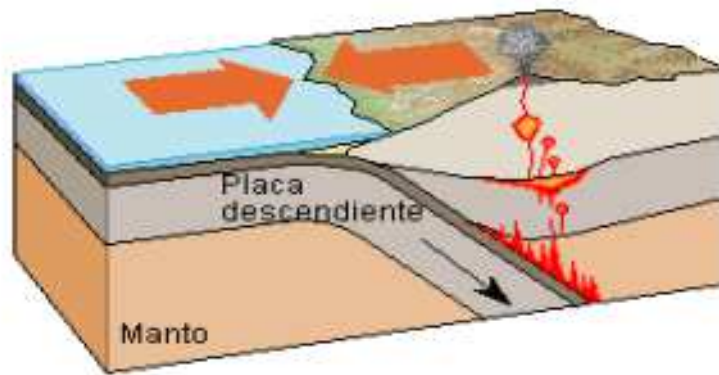


Ilustración 2. Borde Convergente.

Fuente: Modelamiento del movimiento de las placas tectónicas. Universidad Nacional de Colombia. Romero.

Corteza oceánica. Es uno de los dos tipos de corteza, es la que esta cubierta por los mares y los océanos, corresponde al 0.099% de la masa de la tierra; en una profundidad de 0-30 km (Romero)

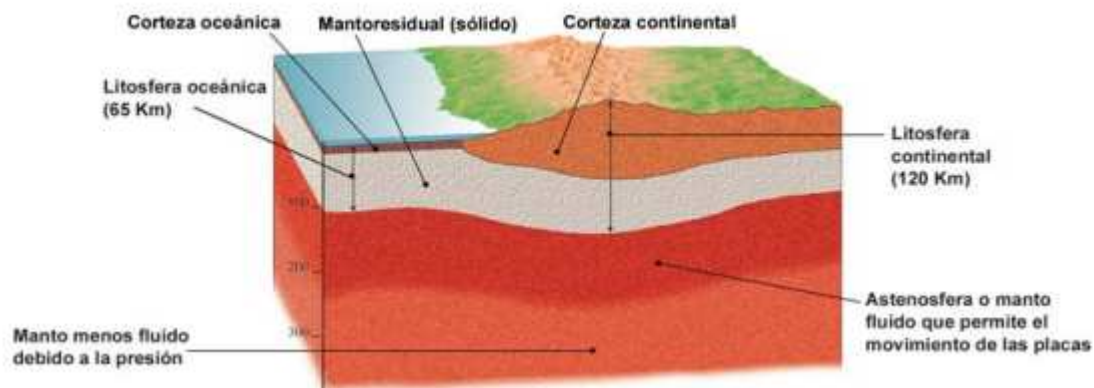


Ilustración 3. Astenosfera.

Fuente: Modelamiento del movimiento de las placas tectónicas. Universidad Nacional de Colombia. Romero.

Corteza Terrestre. Capa más delgada y externa de la tierra. En los continentes tiene un grosor promedio de 35 kilómetros. Existen dos tipos de corteza terrestre: corteza oceánica y corteza continental. (Romero)

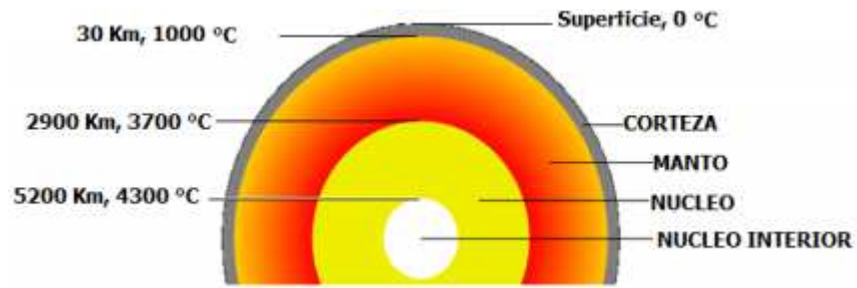


Ilustración 4. Corteza terrestre e interior de la Tierra

Fuente: Modelamiento del movimiento de las placas tectónicas. Universidad Nacional de Colombia. Romero.

Corteza Continental. Teoría por el cual las placas que sustentan los continentes, se desplazan desde hace millones de años de la historia geológica de la tierra. Este movimiento se debe a que continuamente sale material del manto por debajo de la corteza oceánica y se crea una fuerza que empuja las zonas ocupadas por los continentes (las placas continentales) y, en consecuencia, les hace cambiar de posición. (Romero)

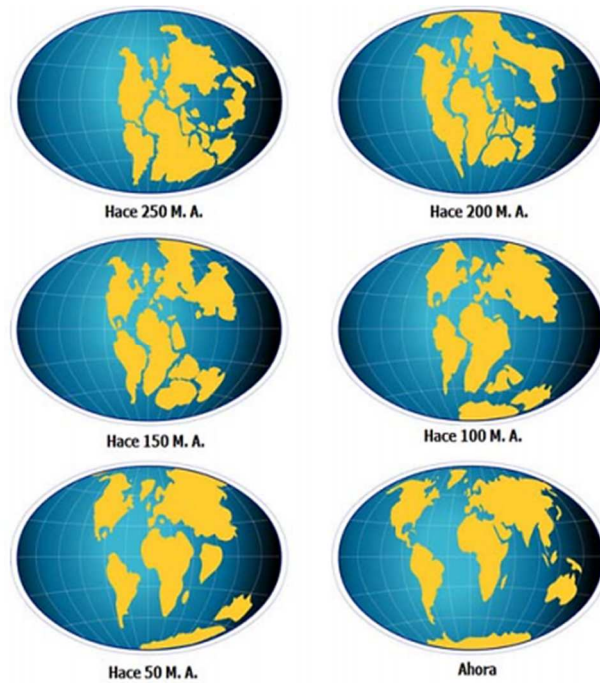


Ilustración 5. Deriva continental.

Fuente: Modelamiento del movimiento de las placas tectónicas. Universidad Nacional de Colombia. Romero.

Dorsales Oceánicas. Son cordilleras submarinas, formadas por el desplazamiento de las placas tectónicas. Las dorsales del centro de los océanos forman el sistema montañoso más extenso del mundo, abarcando alrededor de 60.000 kilómetros. Se generan cuando en el manto terrestre se produce un ascenso de rocas fundidas que rompen la corteza oceánica y dan lugar a la formación de una fisura de miles de kilómetros de longitud en la que se produce un intenso volcanismo. Una dorsal es por tanto el borde divergente de dos placas oceánicas. (Romero).

Lava. Magma o roca fundida que alcanza la superficie de la tierra. (Romero)

Placa Tectónica. Son áreas donde la presencia de estas grietas indica que la corteza está sufriendo divergencia y distenciones. Es una fosa tectónica. Estas zonas son producto de la separación de las placas adyacentes. La superficie de la tierra está dividida en unas 15 placas mayores. (Romero)

Zona de Subducción. Segmento de la placa oceánica que desciende y se sumerge bajo una placa continental u oceánica a lo largo de la fosa marina; en ella se sitúan generalmente los focos de sismos que definen la zona de Wadati-Benioff o Zona de Benioff. (Romero)

Zona de Benioff. Zona definida por los focos de terremotos, de un espesor de unas decenas de kilómetros, que desciende desde la superficie bajo la corteza terrestre con ángulos que varían entre 30° y 80°. (Romero)

Deformación y tasa de deformación

La deformación no tiene dimensiones y se calcula en relación al desplazamiento ΔL a la longitud inicial del cuerpo deformante L (Gerya, 2019).

$$\gamma = \frac{\Delta L}{L}$$

Ecuación 1. Cálculo de deformación

Donde:

γ = deformación.

ΔL = desplazamiento de la partícula por el campo gravitacional.

L = longitud del cuerpo deformante.

Por analogía con el esfuerzo, se puede discriminar la deformación normal y de corte correspondiente a la deformación axial y de corte respectivamente (Gerya, 2019).

La definición de deformación dada por la ecuación 1, sólo se puede aplicar en casos de deformaciones axiales y de corte relativamente simples. En caso de una deformación más compleja, el tensor de deformación ε se define como (Gerya, 2019):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Ecuación 2. Cálculo para una deformación compleja

Dentro de las variables se encuentran:

ϵ es la deformación del tensor

$\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ = derivada de coordenadas en el vector u_i con respecto al desplazamiento en x_j

$\frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ = derivada de coordenadas en el vector u_j con respecto al desplazamiento en x_i

Donde i y j son índices de coordenadas (x, y, z) y x_i y x_j son coordenadas espaciales x_x, x_y y x_z son coordenadas x -, y - y z - respectivamente. en contraste al símbolo i - y a los índices j -, y x_i y x_j son coordenadas físicas de puntos geométricos (Gerya, 2019)

En 3D se puede definir nueve componentes del tensor (Gerya, 2019):

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) = \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

Ecuación 3. Componente x del tensor en 3D

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial u_y}{\partial y}$$

Ecuación 4. Componente y del tensor en 3D

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

Ecuación 5. Componente z del tensor en 3D.

Y seis componentes de deformación

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$$

Ecuación 6. Componente de deformación en xy

$$\epsilon_{xz} = \epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)$$

Ecuación 7. Componente de deformación en xz

$$\epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)$$

Ecuación 8. Componente de deformación en yz

La derivada temporal del vector de desplazamiento es el vector de velocidad $v = (v_x, v_y, v_z)$ de modo que:

$$v_i = \frac{Du_i}{Dt}$$

Ecuación 9. Ecuación de velocidad

Donde:

v_i = vector de desplazamiento en i

$\frac{Du_i}{Dt}$ = derivada de coordenadas en el vector u_i con respecto al desplazamiento en Dt

Y la velocidad de deformación en 3D

$$v_x = \frac{Du_x}{Dt}$$

Ecuación 10. Velocidad de deformación en x

$$v_y = \frac{Du_y}{Dt}$$

Ecuación 11. Velocidad de deformación en y

$$v_z = \frac{Du_z}{Dt}$$

Ecuación 12. Velocidad de deformación en z

El tensor de deformación se usa ampliamente cuando se considera la deformación elástica. En la modelación geodinámica numérica, es conveniente utilizar la tasa de deformación, que caracteriza la dinámica de los cambios en la deformación interna en lugar de la deformación que caracteriza la cantidad total de deformación en comparación con la deformación inicial. El tensor de tasa de tensión $\dot{\epsilon}_{ij}$ es la derivada del tiempo (indicada por punto en la parte superior del símbolo de la deformación) del tensor de tensión ϵ_{ij} . Los componentes del tensor de velocidad de deformación se definen a través de los gradientes espaciales de la velocidad de la siguiente manera (Gerya, 2019).

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

Ecuación 13. Definición de los gradientes espaciales

En donde las variables son:

$\dot{\varepsilon}_{ij}$ = la tasa de tensión en el tensor

$\frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ = derivada de la velocidad en el índice i con respecto al desplazamiento en j

$\frac{\partial v_j}{\partial x_i}$ = derivada de la velocidad en el índice j con respecto al desplazamiento en i

Donde i y j son índices de coordenadas y x_i y x_j son coordenadas espaciales tales que, en 3D podemos definir 9 componentes tensoriales (Gerya, 2019):

Tres componentes normales de la tasa de deformación:

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) = \frac{\partial v_x}{\partial x}$$

Ecuación 14. Componente x, tasa de deformación.

$$\dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial v_y}{\partial y}$$

Ecuación 15. Componente y, tasa de deformación

$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

Ecuación 16. Ecuación componente z, tasa de deformación

Y seis componentes de tasa de deformación

$$\dot{\varepsilon}_{xy} = \dot{\varepsilon}_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)$$

Ecuación 17. Componente tasa de deformación xy, yx

$$\dot{\varepsilon}_{xz} = \dot{\varepsilon}_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)$$

Ecuación 18. Componente tasa de deformación xz, zx

$$\dot{\epsilon}_{yz} = \dot{\epsilon}_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)$$

Ecuación 19. Componente tasa de deformación yz, zy

De manera similar al tensor de deformación, la forma simétrica de la tasa de tensor de deformación se obtiene restando el componente de rotación del campo de velocidad: es fácil verificar que la rotación del cuerpo rígido en 2D tenga gradientes en el campo de velocidad que no produzcan ninguna deformación interna, es decir, la forma simétrica del tensor de velocidad de deformación se obtiene restando el componente rotacional del campo de velocidad, es decir (Gerya, 2019):

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) = 0$$

Ecuación 20. Ecuación de la forma simétrica de la tasa de tensor de deformación.

Por analogía con el tensor de esfuerzo, el tensor de velocidad de deformación también puede subdividirse en $\dot{\epsilon}_{kk}$ isotrópico (que es invariante) y componentes desviadores $\dot{\epsilon}'_{ij}$

$$\dot{\epsilon}_{kk} = \dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy} + \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \text{div}(\vec{v})$$

Ecuación 21. Ecuación componente isotrópico

Donde:

$\dot{\epsilon}_{kk}$ = velocidad de deformación isotrópica

$\dot{\epsilon}_{xx}$ = Velocidad isotrópica en el eje x

$\dot{\epsilon}_{yy}$ = Velocidad isotrópica en el eje y

$\dot{\epsilon}_{zz}$ = Velocidad isotrópica en el eje z

$\frac{\partial v_x}{\partial x}$ = Derivada de la velocidad con respecto al desplazamiento en x

$\frac{\partial v_y}{\partial y}$ = Derivada de la velocidad con respecto al desplazamiento en y

$\frac{\partial v_z}{\partial z}$ = Derivada de la velocidad con respecto al desplazamiento en z

$$\dot{\varepsilon}'_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} - \delta_{ij} \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk}$$

Ecuación 22. Ecuación componente desviador

En donde la variable $\dot{\varepsilon}'_{ij}$ es un componente desviador y donde i, j y k son índices de coordenadas.

Según las ecuaciones 21 y 22 la suma de los componentes de velocidad de deformación desviadora normal es 0.

$$\dot{\varepsilon}'_{xx} + \dot{\varepsilon}'_{yy} + \dot{\varepsilon}'_{zz} = 0$$

Ecuación 23. Ecuación suma de componentes de velocidad de deformación desviadora normal

Al igual que el segundo invariante de esfuerzo, el segundo invariante del tensor de velocidad de deformación desviada se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}'^2_{ij}}$$

Ecuación 24. Ecuación de tensor de velocidad de deformación desviada

Ecuación de Momentum

La deformación de los medios continuos siempre resulta del balance de varias fuerzas internas y externas que actúan sobre estos medios. Para relacionar las fuerzas y la deformación se debe utilizar una ecuación de movimiento. Esta es la llamada ecuación de momento, que describe la conservación del momento para un medio continuo en el campo de la gravedad.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = \rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$$

Ecuación 25. Ecuación de momentum forma Euleriana

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = \rho \frac{Dv_i}{Dt}$$

Ecuación 26. Ecuación de momentum forma Lagrangiana

La ecuación de momento es un diferencial equivalente a la segunda ley del movimiento de Newton, que describe los cambios en la velocidad de un objeto con una masa m de acuerdo a (Gerya, 2019):

$$f = ma$$

Ecuación 27. Ecuación segunda ley de movimiento de Newton

Donde f es una fuerza neta que actúa sobre el objeto y $a = \frac{\partial v}{\partial t}$, es la aceleración del objeto.

Esta ley se puede escribir en forma vectorial:

$$\vec{f} = m\vec{a} \text{ o } f_i = ma_i,$$

Ecuación 28. Ecuación vectorial, segunda ley de movimiento de Newton

$$f_i = ma_x$$

Ecuación 29. Ecuación segunda ley de movimiento de Newton en x

$$f_i = ma_y$$

Ecuación 30. Ecuación segunda ley de movimiento de Newton en y

$$f_i = ma_z$$

Ecuación 31. Ecuación segunda ley de movimiento de Newton en z

Donde i denota el índice de coordenadas y $a_i = \frac{Dv_i}{Dt}$ son los componentes del vector de aceleración.

$$f_x = f_{xA} + f_{xB} + f_{xC} + f_{xD} + f_{xE} + f_{xF} + mg_x$$

Ecuación 32. Ecuación de la fuerza neta en dirección x en el volumen Lagrangiano

Donde la fuerza neta f_x que actúa en la dirección x en el volumen Lagrangiano en un campo de gravedad puede representarse como una suma de 7 fuerzas elementales, $f_{xA} - f_{xF}$ son fuerzas relacionadas con el esfuerzo que actúan desde el exterior del volumen en los límites

respectivos (A - F) y mg_x es la fuerza de gravedad, que es proporcional a la masa incorporada en el volumen. Las fuerzas relacionadas con el esfuerzo son proporcionales a las superficies de los límites respectivos y se pueden calcular de la siguiente manera (Gerya, 2019):

$$f_{xA} = -\sigma_{xxA}\Delta y\Delta z,$$

Ecuación 33. Ecuación fuerza en A

$$f_{xB} = +\sigma_{xxB}\Delta y\Delta z,$$

Ecuación 34. Ecuación fuerza en B

$$f_{xC} = -\sigma_{xyC}\Delta x\Delta z,$$

Ecuación 35. Ecuación fuerza en C

$$f_{xD} = +\sigma_{xyD}\Delta x\Delta z,$$

Ecuación 36. Ecuación fuerza en D

$$f_{xE} = -\sigma_{xze}\Delta x\Delta y,$$

Ecuación 37. Ecuación fuerza en E

$$f_{xF} = +\sigma_{xzf}\Delta x\Delta y,$$

Ecuación 38. Ecuación fuerza en F

Donde $\sigma_{xxA}, \sigma_{xxB}, \sigma_{xyC}, \sigma_{xyD}, \sigma_{xze}, \sigma_{xzf}$ son los componentes de esfuerzo normal y de corte definidos en los límites respectivos y de $f_{xA} - f_{xF}$ son las 7 fuerzas elementales que existen en un campo gravitacional

Se puede escribir la segunda ley de movimiento de Newton para el volumen Lagrangiano considerado:

$$f_{xA} + f_{xB} + f_{xC} + f_{xD} + f_{xE} + f_{xF} + mg_x = ma_x$$

O

$$(\sigma_{xxB} - \sigma_{xxA})\Delta y\Delta z + (\sigma_{xyD} - \sigma_{xyC})\Delta x\Delta z + (\sigma_{xzf} - \sigma_{xze})\Delta x\Delta y + mg_x = ma_x$$

Ecuación 39. Ecuaciones segunda ley de movimiento de Newton para volumen Lagrangiano

Normalizando ambos lados de la ecuación 39 por el volumen Lagrangiano considerado,

$$V = \Delta x \Delta y \Delta z$$

Ecuación 40. Ecuación normalizada Volumen Lagrangiano

Donde:

V = pequeño volumen Lagrangiano

Δx = Dimensión en x de un pequeño volumen Lagrangiano

Δy = Dimensión en y de un pequeño volumen Lagrangiano

Δz = Dimensión en z de un pequeño volumen Lagrangiano

Ahora se obtiene la ecuación de x- momento en la representación de diferencias

$$\frac{(\sigma_{xxB} + \sigma_{xxA})\Delta y \Delta z}{v} + \frac{(\sigma_{xyD} + \sigma_{xyC})\Delta x \Delta z}{v} + \frac{(\sigma_{xzF} + \sigma_{xzE})\Delta x \Delta y}{v} + \frac{m}{V} g_x = \frac{m}{V} a_x,$$

Ecuación 41. Ecuación de diferencias de esfuerzos 01

En donde:

$\sigma_{xxA}, \sigma_{xxB}, \sigma_{xyC}, \sigma_{xyD}, \sigma_{xzE}, \sigma_{xzF}$ = son componentes del esfuerzo normal

v = es la velocidad

V = Volumen del objeto

m = masa del objeto

g_x = gravedad

a_x , = aceleración en x'

O

$$\frac{(\sigma_{xxB} + \sigma_{xxA})}{\Delta x} + \frac{(\sigma_{xxD} + \sigma_{xyC})}{\Delta y} + \frac{(\sigma_{xzF} + \sigma_{xzE})}{\Delta z} + p g_x = p a_x$$

Ecuación 42. Ecuación de diferencias de esfuerzos 02

En donde:

ρ = densidad

O

$$\frac{\Delta\sigma_{xx}}{\Delta x} + \frac{\Delta\sigma_{xy}}{\Delta y} + \frac{\Delta\sigma_{xz}}{\Delta z} + \rho g_x = \rho a_x,$$

Ecuación 43. Ecuación de diferencias de esfuerzos 03

$$\rho = \frac{m}{V},$$

Ecuación 44. Ecuación de densidad

Donde:

ρ = densidad media de un objeto

m = Masa del objeto

V = volumen del objeto

$$\Delta\sigma_{xx} = \sigma_{xxB} - \sigma_{xxA},$$

Ecuación 45. Diferencia de componente de esfuerzo en x

En donde:

$\Delta\sigma_{xx}$ = Componente de esfuerzo en x

$$\Delta\sigma_{xy} = \sigma_{xyD} - \sigma_{xyC},$$

Ecuación 46. Diferencia de componente de esfuerzo en y

En donde:

$\Delta\sigma_{xy}$ = Componente de esfuerzo en y

$$\Delta\sigma_{xz} = \sigma_{xzF} - \sigma_{xzE},$$

Ecuación 47. Diferencia de componente de esfuerzo en z

En donde:

$\Delta\sigma_{xz}$ = Componente de esfuerzo en z

Cuando Δx , Δy , Δz tienden a cero, las diferencias en la ecuación 43 puede ser reemplazado por derivadas y obtenemos la ecuación Lagrangiana de momento x.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\delta x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\delta x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\delta x} + \rho g_x = \rho a_x,$$

Ecuación 48. Ecuación Lagrangiana de momento x-01

O

$$\frac{\delta \sigma_{xj}}{\delta x_j} + \rho g_x = \rho a_x$$

Ecuación 49. Ecuación Lagrangiana de momento x-02

En la anterior ecuación diferencial, se describe un volumen Lagrangiano infinitamente pequeño la densidad ρ corresponde a la densidad local en un punto. Obviamente con base a consideraciones generales, también se puede derivar ecuaciones de momentum y- y z (Gerya, 2019).

Ley de Viscosidad de Newton

Las rocas a menudo se comportan en una escala de tiempo geológico con fluidos altamente viscosos. Por esta razón, la relación geológica viscosa ante el esfuerzo y la tasa de deformación conocida como ley newtoniana de la viscosidad la cual es ampliamente usada en el modelo dinámico. La Ley de Viscosidad de Newton relaciona el esfuerzo cortante τ (Pa) con la velocidad de deformación cortante $\frac{\delta v}{\delta x}$ (l/s) de acuerdo con (Gerya, 2019):

$$\tau = \eta \frac{\delta v}{\delta x}$$

Ecuación 50. Ecuación ley de viscosidad

Donde η (Pa s) es la viscosidad, la cual caracteriza el grado de resistencia que tiene un material a la deformación cortante. La viscosidad generalmente es diferente para materiales distintos, también puede depender de la presión (P), y la temperatura (T), la tasa de deformación y algunos otros parámetros. La viscosidad de las rocas suele ser mayor que 10^{17} Pa s: la viscosidad del manto asteno esférico, por ejemplo, es de aproximadamente 10^{21} (Turcotte y Schubert, 2002).

En 3D la ley de viscosidad obtiene los componentes en la fórmula del esfuerzo desviador σ'_{ij} y la tasa de deformación desviadora $\dot{\epsilon}'_{ij}$, tensores en forma de relaciones constitutivas viscosas de la siguiente manera (Gerya, 2019):

$$\sigma'_{ij} = 2\eta \dot{\epsilon}'_{ij} + \delta_{ij}\eta_{bulk}\dot{\epsilon}_{kk},$$

Ecuación 51. Esfuerzo desviador 01

$$\sigma'_{ij} = 2\eta(\dot{\epsilon}_{ij} - 1/3 \delta_{ij}\dot{\epsilon}_{kk}) + \delta_{ij}\eta_{bulk}\dot{\epsilon}_{kk},$$

Ecuación 52. Esfuerzo desviador 02

Donde: η y η_{bulk} son la viscosidad cortante y la viscosidad en masa respectivamente; $\dot{\epsilon}_{kk}$ es la tasa de deformación Bulk (Ecuación. 21) en respuesta a cambios de volúmenes inelásticos irreversibles (como los debidos a la transformación de fase o compactación).

En ausencia de las fases de transformaciones mineralógicas, las rocas exhiben pequeñas variaciones de densidad relativa. Por lo tanto, la aproximación del fluido incompresible ($\rho = const, \frac{D\rho}{Dt} = 0$) es generalmente válido en este caso $\dot{\epsilon}_{kk} = div(\vec{v}) = 0, \dot{\epsilon}'_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}$ y la ley de fricción viscosa se simplifica a (Gerya, 2019):

$$\sigma'_{ij} = 2\eta \dot{\epsilon}_{ij}$$

Ecuación 53. Ley de fricción viscosa

Ecuación de Navier – Stokes

Usando la ecuación de Momentum (Ecuación. 26) y la relación entre el total (σ_{ij}) y los esfuerzos desviatorios (σ'_{ij}) (Ecuación. 53), podemos introducir presión en la ecuación de Momentum (26) y obtener *La ecuación de movimiento de Navier – Stokes* la cual describe la conservación del impulso para un fluido en el campo de gravedad (Gerya, 2019):

$$\frac{\delta \sigma'_{ij}}{\delta x_j} - \frac{\delta P}{\delta x_i} + \rho g_i = \rho \frac{Dv_i}{Dt}$$

Ecuación 54. Conservación del impulso para un fluido en un campo de gravedad

En donde P es la presión del fluido, ρg_i es la densidad y donde i y j son índices de coordenadas; x_i y x_j son coordenadas espaciales; g_i es el i-ésimo componente del vector de

gravedad $\vec{g} = (g_x, g_y, g_z)$; $\frac{Dv_i}{Dt}$ es la derivada temporal del i-ésimo componente del vector de velocidad (i.e. , vector de aceleración). Por analogía con otras derivadas de tiempo pueden relacionarse con la derivada de tiempo de Euler como (Gerya, 2019):

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \frac{\delta v_i}{\delta t} + \vec{v} \cdot \text{grad}(v_i)$$

Ecuación 55. Derivada del tiempo de Euler

O Vía 3D

$$\begin{aligned} \frac{Dv_x}{Dt} &= \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}, \\ \frac{Dv_y}{Dt} &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z}, \\ \frac{Dv_z}{Dt} &= \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}. \end{aligned}$$

En el caso de la deformación 3D, la ecuación de movimiento de Navier – Stokes corresponde al sistema de tres ecuaciones diferenciales parciales:

$$\frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x = \rho \frac{Dv_x}{Dt}$$

Ecuación 56. Ecuación de Navier – Stokes para componente x

$$\frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y = \rho \frac{Dv_y}{Dt}$$

Ecuación 57. Ecuación de Navier – Stokes para componente y

$$\frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z = \rho \frac{Dv_z}{Dt}$$

Ecuación 58. Ecuación de Navier – Stokes para componente z

En flujos altamente viscosos, las fuerzas inerciales $\frac{Dv_i}{Dt}$ son insignificantes con respecto a la resistencia viscosa y las fuerzas gravitacionales. Por ejemplo, una velocidad de placa típica en geodinámica es del orden de varios cm/año ($n \times 10^{-9} m/s$) y puede cambiar notablemente solo en millones de años ($n \times 10^{13} s$) en consecuencia la típica magnitud de las

“aceleraciones” del manto de flujo será del orden de $\rho \frac{Dv_i}{Dt} \approx \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{n \times 10^{-9}}{n \times 10^{13}} = n \times 10^{-22} \text{ m/s}^2$ esto hace que al lado derecho de la ecuación de Navier – Stokes $\rho \frac{Dv_i}{Dt}$ es despreciable a comparación con ρg_i el término a la izquierda de la ecuación es la magnitud de aceleración gravitacional g_i ; está en orden de 10 m/s^2 , i.e. 10^{23} veces más grande que las aceleraciones del manto de flujo (Gerya, 2019).

En tales casos, la deformación de los flujos resaltados y viscosos se pueden describir mediante la ecuación de Stokes de flujo lento:

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i = 0$$

Ecuación 59. Ecuación de Stokes Flujo Lento

O

$$\frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x = 0$$

Ecuación 60. Ecuación de Stokes componente x

$$\frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y = 0$$

Ecuación 61. Ecuación de Stokes componente y

$$\frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z = 0$$

Ecuación 62. Ecuación de Stokes componente z

Las ecuaciones se pueden simplificar aún más si la viscosidad es constante y el fluido es incomprensible. En este caso, Las ecuaciones de Stokes se simplifican así:

$$\eta \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i^2} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i = 0$$

Ecuación 63. Ecuación de Stokes Simplificada

Donde:

η = es la viscosidad en Pa.

P = a la presión en la que se encuentra el fluido

ρ = la densidad del fluido

Marco referencial

Evolution of the stress and strain fields in the Eastern Cordillera, Colombia.

Obi Edbue, James Kellogg, Aguirre Hector, Torres Carolina (2013).

“El esfuerzo actual en los Andes del norte es el resultado de la convergencia de las placas de Sudamérica, el Caribe y Nazca y la microplaca de Panamá (Ilustración 6) Las mediciones del Sistema de posicionamiento global por GPS (Trenkamp et al., 2002) muestran que el bloque del norte de los Andes se está escapando hacia el noreste en relación con la placa estable de América del Sur a lo largo de un sistema transpresivo de fallas ubicadas a lo largo de los Andes de Mérida, la Cordillera Oriental y los Andes ecuatorianos (Ilustración 6). Simultáneamente, en la Cordillera Oriental de Colombia, la colisión en curso entre el Arco de Panamá y América del Sur está impulsando la reducción permanente de NW-SE y el rápido aumento de la gama. La subducción de ángulo bajo de la flotante placa del Caribe también está impulsando el acortamiento permanente de NW-SE en los Mérida Andes y la Cordillera Oriental. El conocimiento del régimen de estrés en evolución en la Cordillera Oriental es clave para comprender los procesos geodinámicos en funcionamiento dentro de la región, así como la evolución de las trampas estructurales y los sistemas de fractura para los hidrocarburos” (Obi Egbue, James Kellogg, Hector Aguirre, Carolina Torres, 2013)

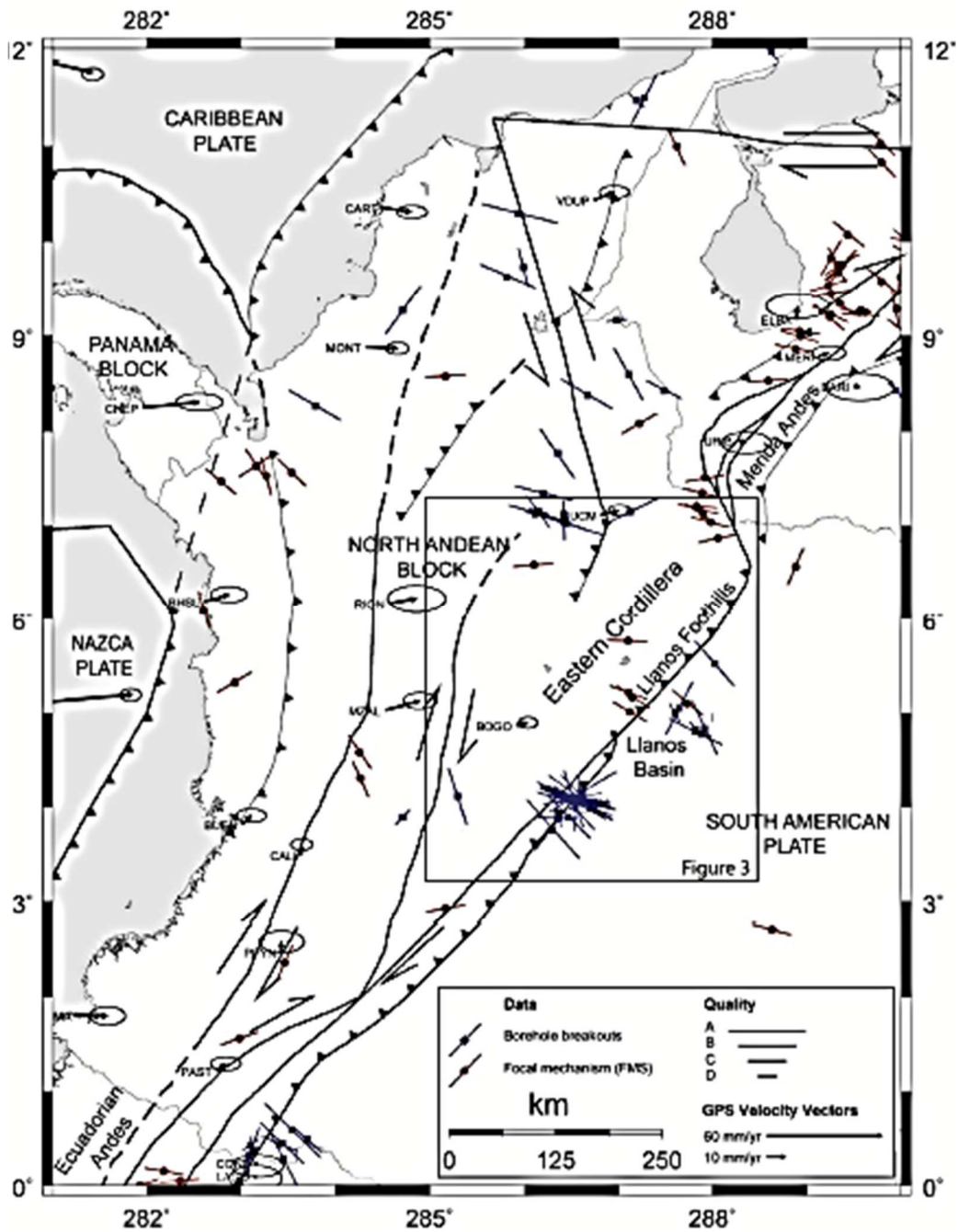


Ilustración 6. Esfuerzo actual de los Andes del Norte.

Fuente: Evolution of the stress and strain fields in the Eastern Cordillera, Colombia. Obi Edbue, James Kellogg, Hector Aguirre, Carolina Torres, 2013

En la ilustración 6, se puede observar el esfuerzo actual en los Andes del norte, como el resultado de la convergencia de las placas de Sudamérica, el Caribe y Nazca y la microplaca de Panamá.

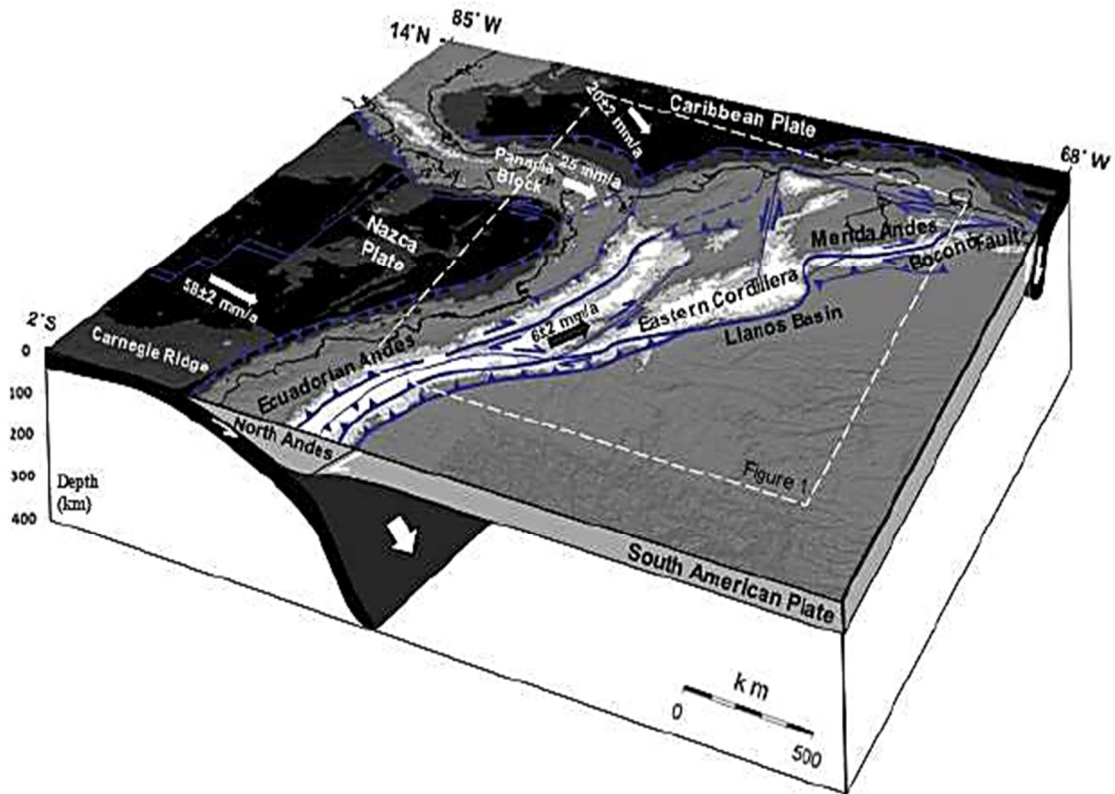


Ilustración 7. Bloque de los Andes, escapando hacia el Noreste..

Fuente: Evolution of the stress and strain fields in the Eastern Cordillera, Colombia. (Obi Edbue, James Kellogg, Hector Aguirre, Carolina Torres, 2013)

En la ilustración 7, se puede apreciar cómo el bloque de los Andes se está escapando hacia el noreste en relación con la placa estable Suramericana a lo largo de un sistema transpresivo de fallas ubicadas a lo largo de los Andes de Mérida, la Cordillera Oriental y los Andes ecuatorianos.

Deformation and hydrofracture in a subduction thrust at seismogenic depths: The Rodeo Cove thrust zone, Marin Headlands, California.

Meneghini Francesca, Moore Casey J.

La examinación directa de los impulsos de subducción, potencialmente, puede abordar una serie de preguntas con respecto a la deformación y los terremotos en zonas sismogénicas. Dado que el bloqueo de la falla es necesario para permitir la acumulación de tensión, los terremotos consecuentes y las caídas de tensión (~ 30 barras; Kanamori y Anderson, 1975), la pregunta fundamental es ¿qué controla el inicio del bloqueo en el sistema de empuje de subducción? ¿Qué tipos de procesos incrementales de litificación, transformaciones de fase o cambios en la presión del fluido conducen al bloqueo y la aparición de terremotos con profundidad a lo largo de los empujes de subducción?” (Francesca Meneghini, J. Casey Moore, 2007)

Para que un impulso de subducción exhumado conserve su historial de emplazamientos en la zona sismógena, la deformación debe aislarse de eventos anteriores y posteriores: la deformación posterior debe ser leve, o al menos claramente sobreimprimir la deformación anterior. Además, la deformación puede o no, ser adquirida durante el aplanamiento del paquete oceánico antes del emplazamiento en la zona sismogénica. Esta deformación debe ser separable de la falla asociada con el emplazamiento. Afortunadamente, la sincronía del clímax metamórfico y la principal deformación en el empuje de Rodeo Cove sugiere que este evento representa la base del terreno para el prisma de acreción (Van Gool y Cawood, 1994). Por lo tanto, es probable que cada empuje delimitador represente una parte de una vez activa del escote o del empuje de la placa. La deformación posterior es muy débil y siempre se distingue claramente de la principal. evento de deformación. (Francesca Meneghini, J. Casey Moore, 2007).

Deformation of the Central Andean Upper Plate System – Facts, Fiction, and Constraints for Plateau Models.

Onno Oncken, David Hindle, Jonas Kley, Kirsten Elger, Pia Victor, Kerstin Schemmann.

Hasta la fecha, la pregunta de ¿por qué y cómo un orógeno de tipo meseta se formó con engrosamiento de la corteza en el borde de la parte occidental de Sudamérica?, sigue siendo uno de los temas más debatidos en geodinámica. Durante el Cenozoico, los altiplanos y Puna Plateaux de los Andes centrales (elevación media de unos 4 km, con una extensión de 400 × 2 000 km) se desarrollaron durante la subducción continua de la placa oceánica de Nazca en una configuración de margen continental convergente, una situación que es Único a lo largo de los 60 000 km de márgenes convergentes en todo el mundo. El desafío clave es entender porqué el fallo mecánico de la extensión de la meseta posterior se desarrolló a lo largo de la parte central del borde delantero de Sudamérica solamente, así como por qué y cómo esta característica se desarrolló solo durante el Cenozoico, aunque el ciclo de subducción andina ha estado en curso desde al menos el Jurásico. Desde la década de 1980, se ha publicado una gran cantidad de modelos que intentan encontrar una solución a esta ‘geodinámica paradoja’ (Allmendinger et al. 1997). Estos caen en clases distintas con respecto a los mecanismos clave, aunque algunos de los modelos implican una combinación de varios procesos (Onno Oncken, David Hindle, Jonas Kley, Kirsten Elger, Pia Victor, Kerstin Schemmann, 2006).

La única información accesible que está disponible para evaluar estos modelos parcialmente competidores es la respuesta de la placa superior a estos procesos geodinámicos a través del tiempo. Entre otros aspectos, prácticamente todos los modelos anteriores se basan en la cantidad observada, la distribución y el tiempo de la deformación de la corteza y el engrosamiento de los Andes centrales como elemento clave. Sin embargo, aunque existe una gran cantidad de información relacionada sobre los Andes, su naturaleza es altamente heterogénea y nunca se ha resumido sistemáticamente, con la excepción de la distribución de acortamiento (Kley y Monaldi 1998). Sólo para transectos seleccionados, la magnitud del acortamiento, las estructuras y el tiempo de deformación se evaluaron conjuntamente con mayor resolución (Jordan et al. 1993; Echavarría et al. 2003; Víctor et al. 2004; Elger et al. 2005). Estos últimos estudios proporcionan un avance importante en la comprensión de la

acumulación de deformación, pero no han resuelto la controversia anterior. Por lo tanto, aún se requiere una resolución espacial y temporal más precisa de los períodos de deformación y los patrones de partición de la tensión en toda la meseta, y su efecto sobre el engrosamiento de la corteza. Los Andes centrales se prestan para tal análisis debido a la preservación única de los depósitos Syn y tectónicos en las cuencas locales a gran escala en todo el país. Estos depósitos a menudo tienen edades bien establecidas (a través de la datación de depósitos volcánicos) y relaciones transversales con estructuras vecinas o subyacentes. Esta situación permite una evaluación de la acumulación de deformación que no tiene paralelo en su detalle cuando se compara con casi todos los demás cinturones orogénicos (Onno Oncken, David Hindle, Jonas Kley, Kirsten Elger, Pia Victor, Kerstin Schemmann, 2006).

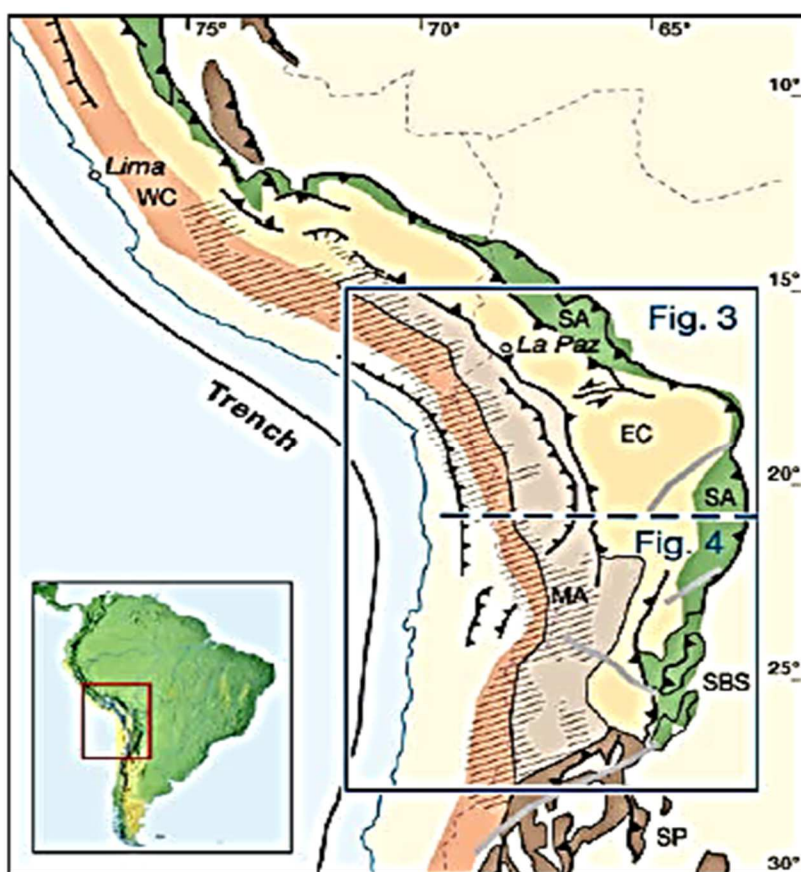


Ilustración 8. Croquis geológico mostrando las principales unidades que construyen los Andes Centrales..

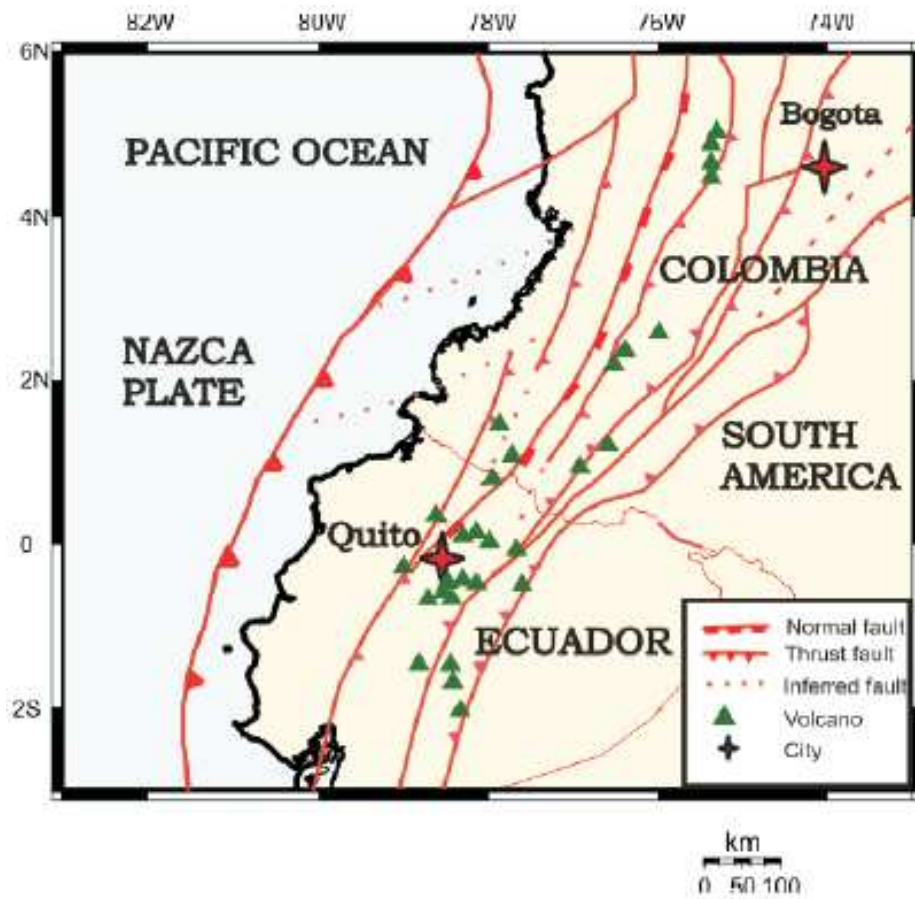
Fuente: Deformation of the Central Andean Upper Plate System – Facts, Fiction and Constraints for Plateau Models. Onno Oncken, David Hindle, Jonas Kley, Kirsten Elger, Pia Victor, Kerstin Schemmann. 2006.

La ilustración 8, hace referencia al croquis geológico, donde se evidencian las principales unidades que construyen los Andes Centrales. WC: Cordillera Occidental; EC: Cordilleras orientales; SBS: Sistema de Santa Bárbara; SP: Sierras Pampeanas; SA: gamas subandinas; MA: arco magmático actual (área sombreada). El recuadro muestra la ubicación de los Andes centrales.

Geometric Model of the Nazca plate subduction

Patricia Pedraza García, Carlos Alberto Vargas, Hugo Monsalve J.

Se propone un modelo geométrico de la subducción de la placa Nazca bajo la placa suramericana en el suroeste de Colombia, basado en la relocalización de hipocentros de sismos locales y telesismos. Mediante la inversión simultánea de formas de ondas internas P y SH telesísmicas se ajustan las profundidades de 15 eventos con $M_w \geq 5.8$ y se relocalizan los hipocentros de 250 eventos con lecturas de fases registradas desde 1990 hasta 2005 por las agencias International Seismological Centre (ISC), y U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center (NEIC). Se propone un modelo de secciones hipocentrales teniendo en cuenta la curvatura de la Tierra y la curvatura de la fosa Colombia-Ecuador. Se obtienen tres formas distintas de subducción para la placa Nazca en la fosa Colombia-Ecuador: La primera en el segmento Cali A, donde el ángulo de buzamiento cambia de 17° a 45° , a una profundidad máxima de 100km, la segunda en los segmentos Popayán B y Nariño C donde el ángulo de buzamiento es aproximadamente constante de 30° a una profundidad máxima de 200km y la tercera en el segmento Quito D donde el ángulo de buzamiento cambia de 9° a 50° a una profundidad máxima de 220km. La profundidad máxima de sismicidad a lo largo de la fosa Colombia-Ecuador presenta dos aumentos, el primero entre las latitudes 4.5°N - 5°N y el segundo entre las latitudes 1°S - 2°S , sugiriendo la presencia de las dorsales de Malpelo y Carnegie que generan un bloqueo diferencial respecto a la cuenca del Pacífico Colombo-Ecuatoriano (Patricia Pedraza García, Carlos Alberto Vargas, Hugo Monsalve J., 2007).



*Ilustración 9 .Entorno tectónico placa de Nazca y Suramericana.
 Fuente: Geometric Model of the Nazca plate subduction Patricia Pedraza Garcia, Carlos Alberto Vargas, Hugo Monsalve J (2007).*

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

- 1) Se realiza la búsqueda de información, en la temática referente al tema tratado en la monografía, en diferentes fuentes como: Springer Nature, la base de datos IEEE, MathSciNet, SpringerLink, Science Direct, Scopus, zbMath, entre otras.
- 2) Se procede a generar la traducción y análisis de cada uno de los documentos, de las fuentes bibliográficas encontradas.
- 3) Se obtiene la programación, proporcionada por el docente director de la investigación.
- 4) Con base en la programación, la cual cuenta con un componente matemático de gran envergadura y hace énfasis en las ecuaciones mencionadas en el marco teórico específico, se lleva a cabo el proceso requerido para el modelamiento.
- 5) Se hace la declaración de las variables a utilizar en el modelamiento de la deformación de la subducción, de las placas Nazca y suramericana durante los primeros 7.5 Ma de la era Cenozoica (temperatura, aceleración, velocidad, constante de gas, tamaño del modelo, definición del tamaño de la grilla, tamaño del modelo topográfico en dirección horizontal, resolución del modelo topográfico, coeficiente de difusión topográfica, elevación máxima, distancia máxima, sedimentos, entre otros).

```
Collision_and_breakoff_1.m x +
28 % Clearing all variables and arrays
29 - clear;
30 % Clearing figures
31 - clf;
32
33 % Temperature at the top, and bottom of the model, K
34 - ttop=273;
35 - tbottom=1750;
36
37
38 % Acceleration of Gravity, m/s^2
39 - gx=0;
40 - gy=9.81;
41
42 % Horizontal collision velocity, m/s
43 % velcol=3/(100*365.25*24*3600); % 2 cm/yr
44 - velcol=7/(100*365.25*24*3600); % 7 cm/yr
45
```

Ilustración 10. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.

En la ilustración 10, se denotan los parámetros de: temperatura, aceleración de la gravedad y velocidad, utilizados durante la programación base del modelamiento de la deformación.

```

Collision_and_breakoff_1.m  x  +
46      % Gas constant J/mol/K
47 -    RGAS=8.314;
48
49      % Initial model size, m
50      % xsize0=6000000;
51 -    xsize0=1000000;
52 -    ysize0=300000;
53 -    xsize=xsize0;
54 -    ysize=ysize0;
55      % Initial water level
56 -    waterlev0=8000;
57 -    waterlev=waterlev0;
58
59      % Defining grid resolution
60 -    xnum=201;
61 -    ynum=61;

```

Ilustración 11. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.

La ilustración 11, muestra los parámetros de concentración de gas, tamaño inicial del modelo inicial del modelo y la resolución de la grilla.

```

Collision_and_breakoff_1.m  x  +
61 -    ynum=61;
62
63      % Viscosity limits for rocks, Pa
64 -    etamin=1e+18;    % Lower limit, Pa
65 -    etamax=1e+25;    % Upper limit, Pa
66      % Lower stress limit for power law, Pa
67 -    stressmin=1e+4;
68
69      % Time to stop convergence (transition to breakoff)
70 -    timestop=12.7e+6*365.25*24*3600; % 12.7 Myr
71
72      % Viscoelastic timestep, s
73      %timemax=1e+4*365.25*24*3600; % 10000 year
74 -    timemax=1e+6*365.25*24*3600; % 1000000 year
75      % Maximal marker displacement step, number of gridsteps
76 -    markmax=0.1;
77      % Moving Markers:
78      % 0 = not moving at all
79      % 1 = simple advection

```

Ilustración 12. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.

```

Collision_and_breakoff_1.m × +
79 % 1 = simple advection
80 % 4 = 4-th order in space Runge-Kutta
81 - markmove=1;
82 % Velocity calculation
83 % 0 = by Solving momentum and continuity equations
84 % 1 = solid body rotation
85 - movemod=0;
86 % Maximal temperature change, allowed for one timestep, K
87 - tempmax=30;
88 % Amount of timesteps
89 % stepmax=10000;
90 - stepmax=7.5;
91
92 % Topography model
93 % Topography model size in horizontal direction
94 - tsize=1000000;
95 % Defining topography model resolution
96 - tnum=1001;
97 % Grid for topography profile

```

Ilustración 13. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.

```

Collision_and_breakoff_1.m × +
97 % Grid for topography profile
98 - gridt=zeros(3,tnum);
99 - tstp=tsize/(tnum-1); % topography grid step
100 - gridt(1,1)=0; % beginning of topography profile
101 - for i=2:1:tnum
102 -     gridt(1,i)=gridt(1,i-1)+tstp;
103 - end
104 % Topography diffusion koefficient Ks, m^2/s
105 % dYt/dt=Ks*d2Yt/dx^2
106 % Define dYt/dt - erosion rate
107 - dYtdt=1/(1000*365.25*24*3600); % 1 mm/yr
108 % Define d2Yt - max elevation
109 - d2Yt=10*1000; % 10 km
110 % Define dx - transport lengthscale
111 - dx=100*1000; % 100 km
112 - Ks=dYtdt*dx^2/d2Yt;
113 - toptime=zeros(1000,1);
114 - tophigh=zeros(1000,tnum);
115 - topowater=zeros(1000,1);

```

Ilustración 14. Parámetros de modelamiento, programación Matlab.¹

¹ Las ilustraciones 10, 11, 12, 13 y 14, fueron tomadas de la programación realizada por el docente director, Quintana Puentes Robinson.

- 6) Una vez definidas las variables, se ingresan los datos para el modelamiento en 2D y 3D de la deformación de la subducción; para 2D los parámetros son: elevación y distancia, para 3D: elevación, tiempo y distancia.
- 7) Se procede al procesamiento de los datos.
- 8) Se obtiene el modelamiento y se imprimen los resultados. Para un análisis de resultados más preciso, se acude a la interpolación utilizando las siguientes convenciones (Tabla 1): Dentro del modelamiento se presentan los puntos más altos, el punto más bajo y puntos, en donde las placas se interceptan con el mar; para realizar el análisis, se toma la distancia entre los puntos más altos que se encuentran en las placas, la distancia que existe entre los puntos a nivel medio del mar en donde las placas se interceptan con el mar, las elevaciones de los puntos más altos y del punto más bajo.

PNMI	Punto nivel del mar, izquierdo
PNMD	Punto nivel del mar, derecho
PSNMI	Punto sobre nivel del mar, izquierdo
PSNMD	Punto sobre nivel del mar, derecho
PBNM	Punto bajo nivel del mar
PASNMI	Punto alto sobre nivel del mar, izquierdo
PASNMD	Punto alto sobre nivel del mar, derecho
<p>Con base al modelamiento generado por el software Matlab, se obtienen las gráficas bidimensionales y tridimensionales de la deformación de la subducción en Colombia de las placas estudiadas, para un análisis más preciso se acude a la interpolación para calcular distancias y elevaciones, tomando como referencias finales los puntos mencionados.</p>	

Tabla 1. Convenciones para un análisis de mayor precisión.

9) Se crean las tablas de interpolación, cada 0.25 Ma aproximadamente, como se muestra a continuación:

A. 0.0045 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 0.0045 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.78	36.28
PNMI	400.00	363.72
	4.30	200.00
	0.70	32.56
PNMD	600.00	632.56
	4.30	200.00
	1.20	55.81
PSNMI	400.00	344.19
	4.30	200.00
	1.10	51.16
PNMD	600.00	651.16

Tabla 2. Cálculos, análisis distancia (0.0045 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 0.0045 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.70	1000.00
PBNM	1000.00	2000.00
	1.70	1000.00
	1.70	1000.00
PASNMI	1000.00	1000.00
	1.70	1000.00
	1.70	1000.00
PASNMD	1000.00	1000.00

Tabla 3. Cálculos, análisis elevación (0.0045 Ma)

B. 0.254 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 0.254 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.70	32.56
PNMI	400.00	367.44
	4.30	200.00
	0.40	18.60
PNMD	600.00	618.60
	4.30	200.00
	3.20	148.84
PSNMI	400.00	251.16
	4.30	200.00
	2.60	120.93
PNMD	600.00	720.93

Tabla 4. Cálculos, análisis distancia (0.255 Ma).

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 0.254 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.25	147.06
PBNM	4000.00	4147.06
	1.70	1000.00
	0.90	529.41
PSNMI	1000.00	1529.41
	1.70	1000.00
	1.35	794.12
PSNMD	1000.00	1794.12

Tabla 5. Cálculos, análisis elevación (0.254 Ma).

C. 0.504 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 0.504 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.00	46.51
PNMI	400.00	353.49
	4.30	200.00
	0.55	25.58
PNMD	600.00	625.58
	4.30	200.00
PSNMI	3.56	165.58
	400.00	234.42
	4.30	200.00
PNMD	2.30	106.98
	600.00	706.98

Tabla 6. Cálculos, análisis distancia (0.504 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 0.504 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.60	352.94
PBNM	4000.00	4352.94
	1.70	1000.00
	1.15	676.47
PSNMI	1000.00	1676.47
	1.70	1000.00
	0.40	235.29
PSNMD	2000.00	2235.29

Tabla 7. Cálculos, análisis elevación (0.504 Ma)

D. 0.753 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 0.753 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.00	93.02
PNMI	400.00	306.98
	4.30	200.00
	0.10	4.65
PNMD	600.00	604.65
	4.30	200.00
	3.30	153.49
PSNMI	400.00	246.51
	4.30	200.00
	1.73	80.47
PNMD	600.00	680.47

Tabla 8. Cálculos, análisis distancia (0.753 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 0.753 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.70	411.76
PBNM	4000.00	4411.76
	1.70	1000.00
	1.15	676.47
PSNMI	2000.00	2676.47
	1.70	1000.00
	0.40	0.00
PSNMD	2000.00	2000.00

Tabla 9. Cálculos, análisis elevación (0.753 Ma)

E. 1.002 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 1.002Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.12	52.09
PNMI	400.00	347.91
	4.30	200.00
	0.18	8.37
PNMD	600.00	591.63
	4.30	200.00
	3.10	144.19
PSNMI	400.00	255.81
	4.30	200.00
	1.50	69.77
PNMD	600.00	669.77

Tabla 10. Cálculos, análisis distancia (1.002 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 1.002Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.30	764.71
PBNM	4000.00	4764.71
	1.70	1000.00
	0.30	176.47
PSNMI	2000.00	2176.47
	1.70	1000.00
	0.90	529.41
PSNMD	2000.00	2529.41

Tabla 11. Cálculos, análisis elevación (1.002 Ma)

F. 1.255 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 1.255Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.30	60.47
PNMI	400.00	339.53
	4.30	200.00
	0.50	23.26
PNMD	600.00	576.74
	4.30	200.00
	2.29	106.51
PSNMI	400.00	293.49
	4.30	200.00
	1.19	55.35
PNMD	600.00	655.35

Tabla 12. Cálculos, análisis distancia (1.255 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN		
Tiempo 1.255Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.30	764.71
PBNM	5000.00	5764.71
	1.70	1000.00
	0.70	411.76
PSNMI	2000.00	2411.76
	1.70	1000.00
	0.60	352.94
PSNMD	2000.00	2352.94

Tabla 13. Cálculos, análisis elevación (1.255 Ma)

G. 1.504 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 1.504Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.60	74.42
PNMI	400.00	325.58
	4.30	200.00
	0.75	34.88
PNMD	600.00	565.12
	4.30	200.00
	2.10	97.67
PSNMI	400.00	302.33
	4.30	200.00
	0.70	32.56
PNMD	600.00	632.56

Tabla 14. Cálculos, análisis distancia (1.504 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 1.504Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.30	176.47
PBNM	6000.00	6176.47
	1.70	1000.00
	0.98	576.47
PSNMI	2000.00	2576.47
	1.70	1000.00
	0.40	235.29
PSNMD	2000.00	2235.29

Tabla 15. Cálculos, análisis elevación (1.504 Ma)

H. 1.753 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 1.753 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.60	74.42
PNMI	400.00	325.58
	4.30	200.00
	1.00	46.51
PNMD	600.00	553.49
	4.30	200.00
	3.05	141.86
PSNMI	400.00	258.14
	4.30	200.00
	0.49	22.79
PNMD	600.00	622.79

Tabla 16. Cálculos, análisis distancia (1.753 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 1.753 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.30	0.00
PBNM	6000.00	6000.00
	1.70	1000.00
	1.20	705.88
PSNMI	2000.00	2705.88
	1.70	1000.00
	0.21	123.53
PSNMD	2000.00	2123.53

Tabla 17. Cálculos, análisis elevación (1.753 Ma)

I. 2.002 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 2.002 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.70	79.07
PNMI	400.00	320.93
	4.30	200.00
	1.30	60.47
PNMD	600.00	539.53
	4.30	200.00
	2.68	124.65
PSNMI	400.00	275.35
	4.30	200.00
	0.20	9.30
PNMD	600.00	609.30

Tabla 18. Cálculos, análisis distancia (2.002 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 2.002 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.20	705.88
PBNM	5000.00	5705.88
	1.70	1000.00
	1.25	735.29
PSNMI	2000.00	2735.29
	1.70	1000.00
	0.20	117.65
PSNMD	2000.00	2117.65

Tabla 19. Cálculos, análisis elevación (2.002 Ma)

J. 2.254 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 2.254 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.25	58.14
PNMI	400.00	341.86
	4.30	200.00
	1.10	51.16
PNMD	600.00	548.84
	4.30	200.00
	2.70	125.58
PSNMI	400.00	274.42
	4.30	200.00
	0.20	9.30
PNMD	600.00	590.70

Tabla 20. Cálculos, análisis distancia (2.254 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 2.254 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.20	117.65
PBNM	6000.00	6117.65
	1.70	1000.00
	1.22	717.65
PSNMI	2000.00	2717.65
	1.70	1000.00
	0.20	117.65
PSNMD	2000.00	2117.65

Tabla 21. Cálculos, análisis elevación (2.254 Ma)

K. 2.504 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 2.502 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.90	88.37
PNMI	400.00	311.63
	4.30	200.00
	0.49	22.79
PNMD	600.00	577.21
	4.30	200.00
	2.80	130.23
PSNMI	400.00	269.77
	4.30	200.00
	2.05	95.35
PNMD	600.00	504.65

Tabla 22. Cálculos, análisis distancia (2.502 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN		
Tiempo 2.502 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.12	658.82
PBNM	6000.00	6658.82
	1.70	1000.00
	0.90	529.41
PSNMI	2000.00	2529.41
	1.70	1000.00
	0.00	0.00
PSNMD	2000.00	2000.00

Tabla 23. Cálculos, análisis elevación (2.502 Ma)

L. 2.756 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 2.756 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.90	88.37
PNMI	400.00	311.63
	4.30	200.00
	1.70	79.07
PNMD	600.00	520.93
	4.30	200.00
	3.00	139.53
PSNMI	400.00	260.47
	4.30	200.00
	3.60	167.44
PNMD	600.00	432.56

Tabla 24. Cálculos, análisis distancia (2.756 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 2.756 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.30	764.71
PBNM	6000.00	6764.71
	1.70	1000.00
	0.50	294.12
PSNMI	2000.00	2294.12
	1.70	1000.00
	0.15	88.24
PSNMD	2000.00	1911.76

Tabla 25. Cálculos, análisis elevación (2.756 Ma)

M. 3.001 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA		
km		
Tiempo 3.001 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.00	93.02
PNMI	400.00	306.98
	4.30	200.00
	2.80	130.23
PNMD	600.00	469.77
	4.30	200.00
	3.10	144.19
PSNMI	400.00	255.81
	4.30	200.00
	0.80	37.21
PNMD	600.00	562.79

Tabla 26. Cálculos, análisis distancia (3.001 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 3.001 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.30	764.71
PBNM	5000.00	5764.71
	1.70	1000.00
	0.30	176.47
PSNMI	2000.00	2176.47
	1.70	1000.00
	0.90	529.41
PSNMD	2000.00	1470.59

Tabla 27. Cálculos, análisis elevación (3.001 Ma)

N. 3.254 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 3.254 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.10	97.67
PNMI	400.00	302.33
	4.30	200.00
	3.20	148.84
PNMD	600.00	451.16
	4.30	200.00
	3.30	153.49
PSNMI	400.00	246.51
	4.30	200.00
	1.10	51.16
PNMD	600.00	548.84

Tabla 28. Cálculos, análisis distancia (3.254 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 3.254 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.20	117.65
PBNM	5000.00	5117.65
	1.70	1000.00
	0.40	235.29
PSNMI	2000.00	2235.29
	1.70	1000.00
	0.90	529.41
PSNMD	2000.00	1470.59

Tabla 29. Cálculos, análisis elevación (3.254 Ma)

O. 3.502 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 3.502 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.20	102.33
PNMI	400.00	297.67
	4.30	200.00
	3.35	155.81
PNMD	600.00	444.19
	4.30	200.00
	3.30	153.49
PSNMI	400.00	246.51
	4.30	200.00
	1.60	74.42
PNMD	600.00	525.58

Tabla 30. Cálculos, análisis distancia (3.502 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 3.502 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.05	617.65
PBNM	4000.00	4617.65
	1.70	1000.00
	0.35	205.88
PSNMI	2000.00	2205.88
	1.70	1000.00
	0.90	529.41
PSNMD	2000.00	1470.59

Tabla 31. Cálculos, análisis elevación (3.502 Ma)

P. 3.754 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 3.754 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.30	106.98
PNMI	400.00	293.02
	4.30	200.00
	3.80	176.74
PNMD	600.00	423.26
	4.30	200.00
	3.50	162.79
PSNMI	400.00	237.21
	4.30	200.00
	1.90	88.37
PNMD	600.00	511.63

Tabla 32. Cálculos, análisis distancia (3.754 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 3.754 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.45	852.94
PBNM	3000.00	3852.94
	1.70	1000.00
	0.05	29.41
PSNMI	2000.00	1970.59
	1.70	1000.00
	0.90	529.41
PSNMD	2000.00	1470.59

Tabla 33. Cálculos, análisis elevación (3.754 Ma)

Q. 4.003 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 4.003 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.40	111.63
PNMI	400.00	288.37
	4.30	200.00
	3.70	172.09
PNMD	600.00	427.91
	4.30	200.00
	3.60	167.44
PSNMI	400.00	232.56
	4.30	200.00
	2.00	93.02
PNMD	600.00	506.98

Tabla 34. Cálculos, análisis distancia (4.003 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 4.003 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.40	235.29
PBNM	3000.00	3235.29
	1.70	1000.00
	0.35	205.88
PSNMI	2000.00	1794.12
	1.70	1000.00
	1.30	764.71
PSNMD	2000.00	1235.29

Tabla 35. Cálculos, análisis elevación (4.003 Ma)

R. 4.256 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 4.256 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	3.10	144.19
PNMI	400.00	255.81
	4.30	200.00
	3.90	181.40
PNMD	600.00	418.60
	4.30	200.00
	3.90	181.40
PSNMI	400.00	218.60
	4.30	200.00
	2.20	102.33
PNMD	600.00	497.67

Tabla 36. Cálculos, análisis distancia (4.256 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 4.256 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.50	294.12
PBNM	2000.00	2294.12
	1.70	1000.00
	0.75	441.18
PSNMI	2000.00	1558.82
	1.70	1000.00
	1.60	941.18
PSNMD	2000.00	1058.82

Tabla 37. Cálculos, análisis elevación (4.256 Ma)

S. 4.500 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 4.500 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.80	130.23
PNMI	400.00	269.77
	4.30	200.00
	4.18	194.42
PNMD	600.00	405.58
	4.30	200.00
	4.10	190.70
PSNMI	400.00	209.30
	4.30	200.00
	2.50	116.28
PNMD	600.00	483.72

Tabla 38. Cálculos, análisis distancia (4.500 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 4.500 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.70	411.76
PBNM	1000.00	1411.76
	1.70	1000.00
	1.00	588.24
PSNMI	2000.00	1411.76
	1.70	1000.00
	0.40	235.29
PSNMD	1000.00	764.71

Tabla 39. Cálculos, análisis elevación (4.500 Ma)

T. 4.754 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA		
km		
Tiempo 4.754 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.92	135.81
PNMI	400.00	264.19
	4.30	200.00
	0.45	20.93
PNMD	400.00	379.07
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PSNMI	200.00	200.00
	4.30	200.00
	0.70	32.56
PNMD	400.00	432.56

Tabla 40. Cálculos, análisis distancia (4.754 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 4.754 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.10	58.82
PBNM	1000.00	941.18
	1.70	1000.00
	1.30	764.71
PSNMI	2000.00	1235.29
	1.70	1000.00
	0.50	294.12
PSNMD	1000.00	705.88

Tabla 41. Cálculo, análisis elevación (4.754 Ma)

U. 5.003 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 5.003 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	1.25	58.14
PNMI	400.00	341.86
	4.30	200.00
	0.80	37.21
PNMD	400.00	362.79
	4.30	200.00
	0.10	4.65
PSNMI	200.00	195.35
	4.30	200.00
	0.30	13.95
PNMD	400.00	413.95

Tabla 42. Cálculos, análisis distancia (5.003 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 5.003 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.82	482.35
PBNM	1000.00	517.65
	1.70	1000.00
	1.55	911.76
PSNMI	2000.00	1088.24
	1.70	1000.00
	0.30	176.47
PSNMD	1000.00	823.53

Tabla 43. Cálculos, análisis elevación (5.003 Ma)

V. 5.252 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 5.252 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.72	126.51
PNMI	400.00	273.49
	4.30	200.00
	1.10	51.16
PNMD	400.00	348.84
	4.30	200.00
	3.70	172.09
PSNMI	400.00	227.91
	4.30	200.00
	0.48	22.33
PNMD	400.00	377.67

Tabla 44. Cálculos, análisis distancia (5.252 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 5.252 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.34	200.00
PBNM	0.00	200.00
	1.70	1000.00
	1.52	894.12
PSNMI	2000.00	1105.88
	1.70	1000.00
	0.12	70.59
PSNMD	1000.00	929.41

Tabla 45. Cálculos, análisis elevación (5.252 Ma)

W. 5.502 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 5.502 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMI	0.00	0.00
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00
	4.30	200.00
	0.60	27.91
PSNMI	200.00	227.91
	4.30	200.00
	0.70	32.56
PNMD	400.00	367.44

Tabla 46. Cálculos, análisis distancia (5.502 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 5.502 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.00	0.00
PBNM	0.00	0.00
	1.70	1000.00
	0.10	58.82
PSNMI	1000.00	1058.82
	1.70	1000.00
	0.35	205.88
PSNMD	1000.00	1205.88

Tabla 47. Cálculos, análisis elevación (5.502 Ma)

X. 5.752 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 5.752 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	2.00	93.02
PNMI	400.00	493.02
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00
	4.30	200.00
	1.00	46.51
PSNMI	400.00	353.49
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00

Tabla 48. Cálculos, análisis distancia (5.752 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 5.752 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.00	0.00
PBNM	0.00	0.00
	1.70	1000.00
	0.50	294.12
PSNMI	1000.00	1294.12
	1.70	1000.00
	0.00	0.00
PSNMD	0.00	0.00

Tabla 49. Cálculos, análisis elevación (5.752 Ma)

Y. 6.002 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 6.002 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.70	32.56
PNMI	400.00	432.56
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00
	4.30	200.00
	1.30	60.47
PSNMI	400.00	339.53
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00

Tabla 50. Cálculos, análisis distancia (6.002 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 6.002 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.00	0.00
PBNM	0.00	0.00
	1.70	1000.00
	0.88	517.65
PSNMI	1000.00	1517.65
	1.70	1000.00
	0.00	0.00
PSNMD	0.00	0.00

Tabla 51. Cálculos, análisis elevación (6.002 Ma)

Z. 6.255 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 6.255 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.92	42.79
PNMI	400.00	442.79
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00
	4.30	200.00
	1.40	65.12
PSNMI	400.00	334.88
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00

Tabla 52. Cálculos, análisis distancia (6.255 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 6.255 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.12	658.82
PBNM	1000.00	341.18
	1.70	1000.00
	1.20	705.88
PSNMI	1000.00	1705.88
	1.70	1000.00
	0.00	0.00
PSNMD	0.00	0.00

Tabla 53. Cálculos, análisis elevación (6.255 Ma)

AA. 6.506 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 6.506 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.40	18.60
PNMI	400.00	418.60
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00
	4.30	200.00
	1.60	74.42
PSNMI	400.00	325.58
	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMD	0.00	0.00

Tabla 54. Cálculo, análisis distancia (6.506 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 6.506 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	1.14	670.59
PBNM	1000.00	329.41
	1.70	1000.00
	1.38	811.76
PSNMI	1000.00	1811.76
	1.70	1000.00
	0.00	0.00
PSNMD	0.00	0.00

Tabla 55. Cálculo, análisis elevación (6.506 Ma)

AB. 6.753 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 6.753 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.00	0.00
PNMI	400.00	400.00
	4.30	200.00
	2.20	102.33
PNMD	400.00	502.33
	4.30	200.00
	2.30	106.98
PSNMI	400.00	293.02
	4.30	200.00
	2.65	123.26
PNMD	400.00	523.26

Tabla 56. Cálculos, análisis distancia (6.753 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 6.753 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.80	470.59
PBNM	1000.00	529.41
	1.70	1000.00
	0.10	58.82
PSNMI	2000.00	1941.18
	1.70	1000.00
	1.20	705.88
PSNMD	1000.00	294.12

Tabla 57. Cálculos, análisis elevación (6.753 Ma)

AC. 7.000 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 7.000 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.40	18.60
PNMI	400.00	381.40
	4.30	200.00
	1.52	70.70
PNMD	400.00	470.70
	4.30	200.00
	1.90	88.37
PSNMI	400.00	311.63
	4.30	200.00
	2.40	111.63
PNMD	400.00	511.63

Tabla 58. Cálculos, análisis distancia (7.000 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 7.000 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.62	364.71
PBNM	1000.00	635.29
	1.70	1000.00
	0.10	58.82
PSNMI	2000.00	2058.82
	1.70	1000.00
	0.10	58.82
PSNMD	1000.00	1058.82

Tabla 59. Cálculos, análisis elevación (7.000 Ma)

AD. 7.250 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA		
km		
Tiempo 7.250 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.70	32.56
PNMI	400.00	367.44
	4.30	200.00
	1.20	55.81
PNMD	400.00	455.81
	4.30	200.00
	2.02	93.95
PSNMI	400.00	306.05
	4.30	200.00
	1.80	83.72
PNMD	400.00	483.72

Tabla 60. Cálculos, análisis distancia (7.250 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 7.250 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.20	117.65
PBNM	1000.00	1117.65
	1.70	1000.00
	0.75	441.18
PSNMI	2000.00	2441.18
	1.70	1000.00
	1.48	870.59
PSNMD	1000.00	1870.59

Tabla 61. Cálculos, análisis elevación (7.250 Ma)

AE. 7.457 Ma.

CÁLCULOS ANÁLISIS DISTANCIA km		
Tiempo 7.457 Ma.		
Distancia	4.30	200.00
	0.78	36.28
PNMI	400.00	363.72
	4.30	200.00
	0.42	19.53
PNMD	400.00	419.53
	4.30	200.00
	2.20	102.33
PSNMI	400.00	297.67
	4.30	200.00
	2.60	120.93
PNMD	400.00	520.93

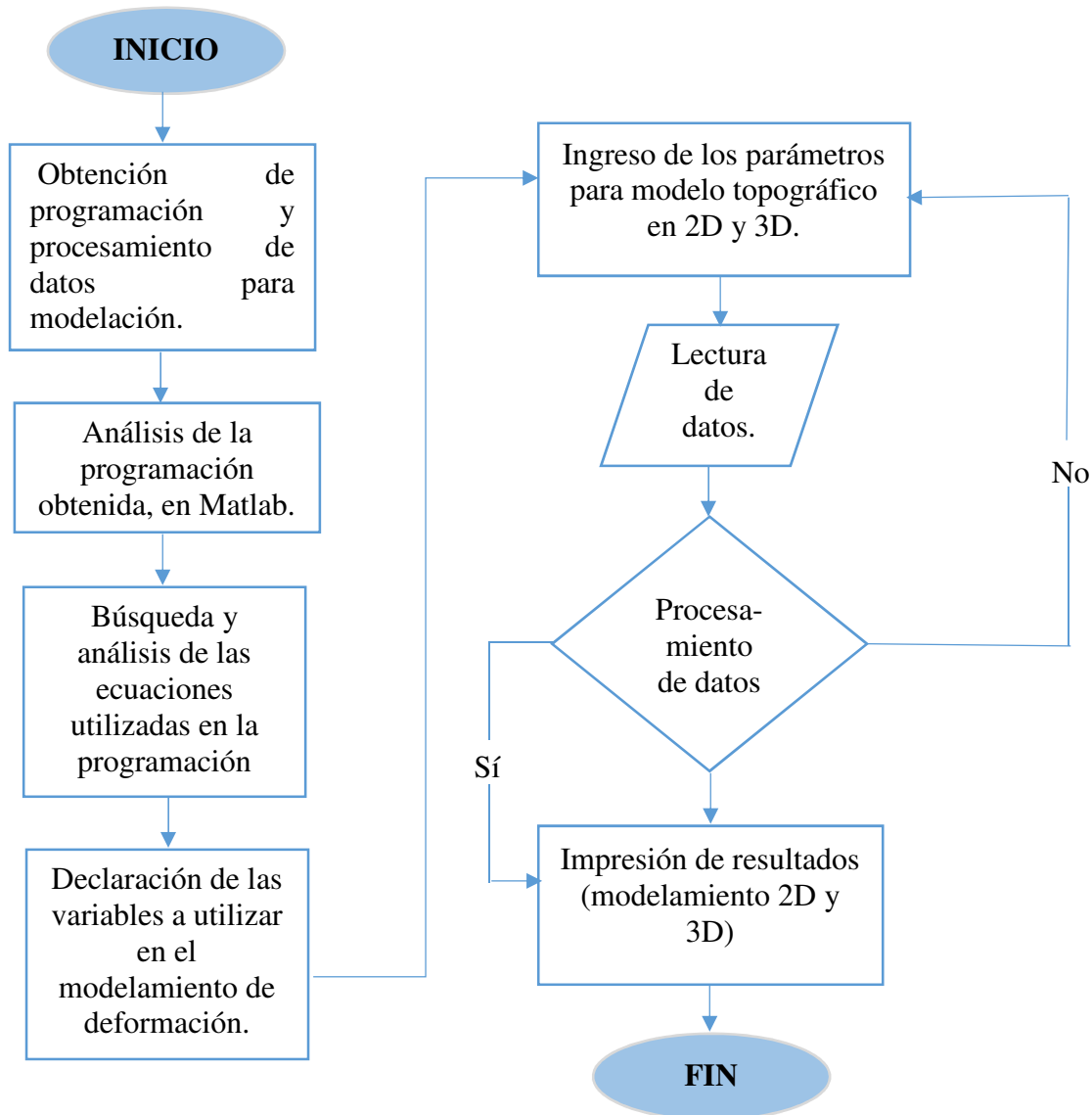
Tabla 62. Cálculos, análisis distancia (7.457 Ma)

CÁLCULOS ANÁLISIS ELEVACIÓN m		
Tiempo 7.457 Ma.		
Elevación	1.70	1000.00
	0.80	470.59
PBNM	1000.00	1470.59
	1.70	1000.00
	1.30	764.71
PSNMI	2000.00	2764.71
	1.70	1000.00
	1.50	882.35
PSNMD	2000.00	2882.35

Tabla 63. Cálculos, análisis elevación (7.457 Ma)

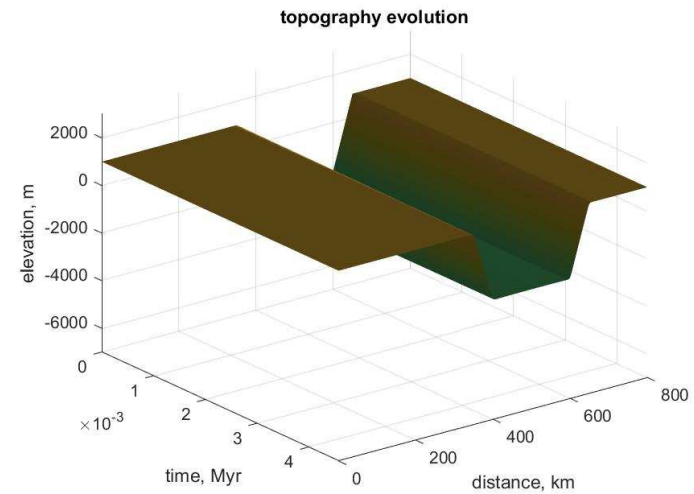
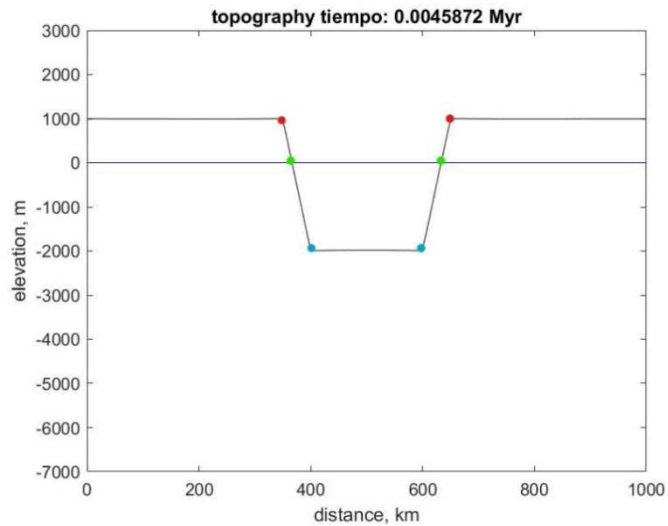
10) Con base en las tablas de interpolación, se procede a hacer el análisis de resultados.

Diagrama de flujo, modelamiento.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

MODELAMIENTO 0.0045 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 363.72 km

Punto nivel del mar derecho: 632.56 km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 344.19 km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 651.16 km

Elevación

Punto bajo a nivel del mar: -2000 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1000 m

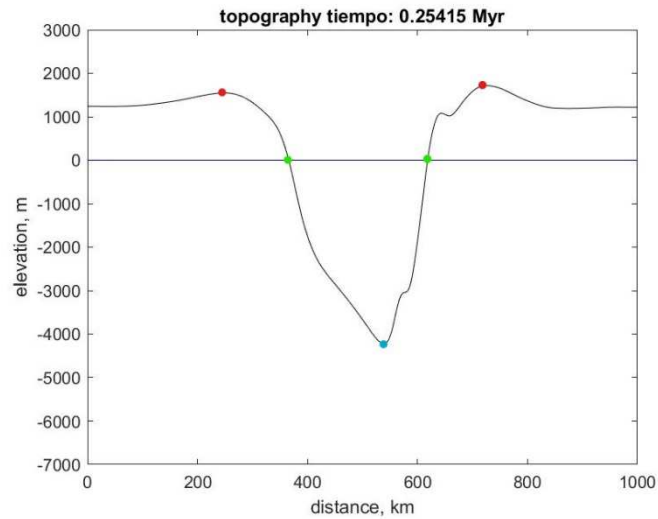
Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 1000 m

- Ptos. Más altos sobre el nivel del mar
- Ptos. Nivel del mar
- Ptos bajo el nivel del mar

3D

Con base al análisis numérico obtenido en el modelamiento 2D, se pueden apreciar cambios muy simétricos de deformación, (estos cambios generados en las antiguas eras geológicas) en lo que compete a la subducción de la placa Nazca en la suramericana; haciendo énfasis en los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 268.84 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 461.16 km.

MODELAMIENTO 0.254 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 367.44 km

Punto nivel del mar derecho: 618.60 km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 251.16 km

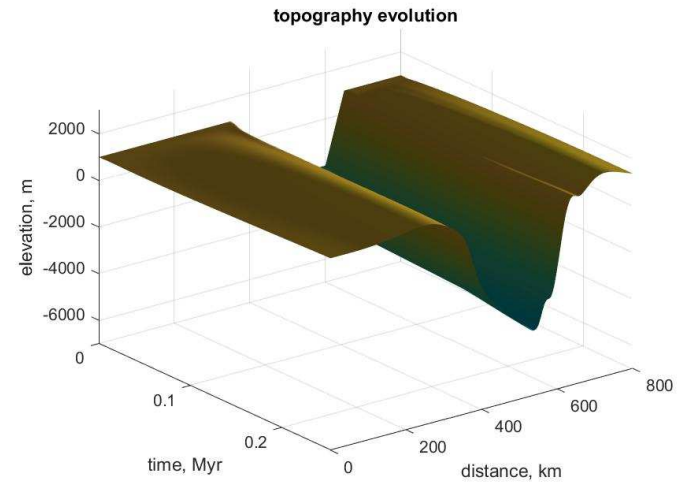
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 720.93 km

Elevación

Punto bajo a nivel del mar: -4147.06 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1529.41 m

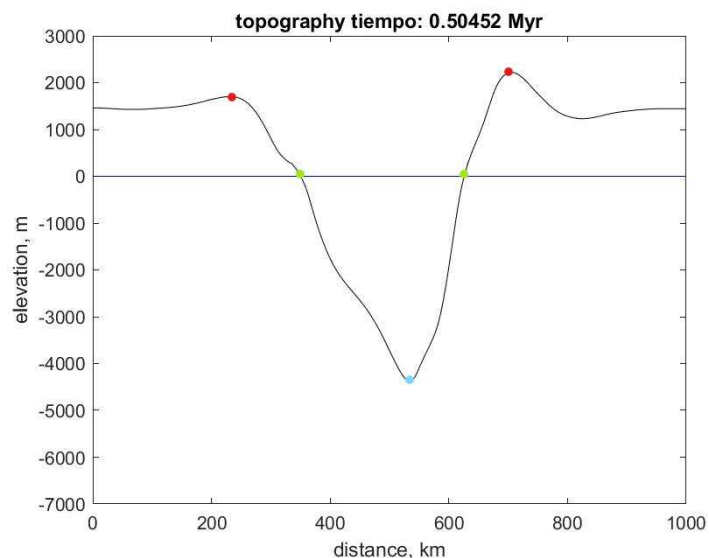
Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 1794.12



3D

Partiendo del análisis numérico generado del modelamiento 2D, se pueden apreciar cambios en lo que compete a la subducción de la placa Nazca en la suramericana, haciendo énfasis en los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 251.16 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 720.96 km, en elevaciones máximas es de ≈ 264.71 m. En el transcurso de este tiempo, se puede evidenciar cómo comienza a generarse la deformación en el relieve, creando consigo dinámicas topográficas.

MODELAMIENTO 0.5045 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo :353.49 Km

Punto nivel del mar derecho: 625.58 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 234.42 Km

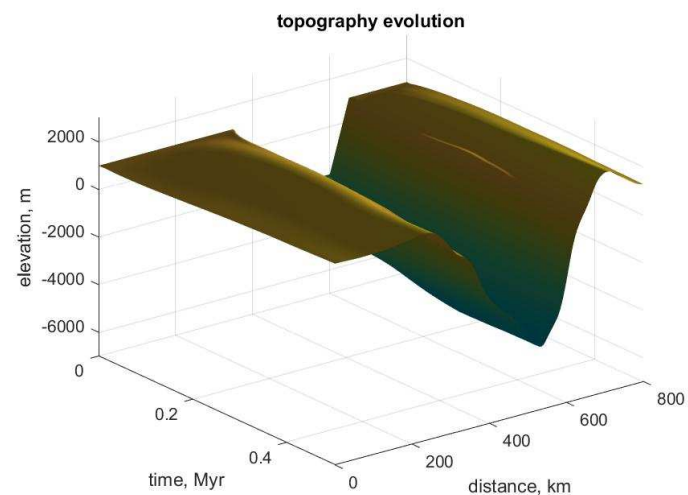
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 706.98 Km

Elevación

Punto bajo el nivel del mar: -4352.94 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1676.47 m

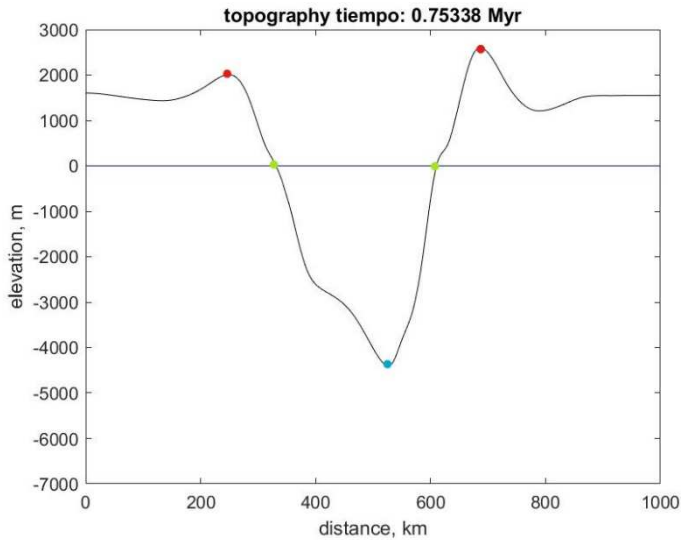
Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2235.29 m



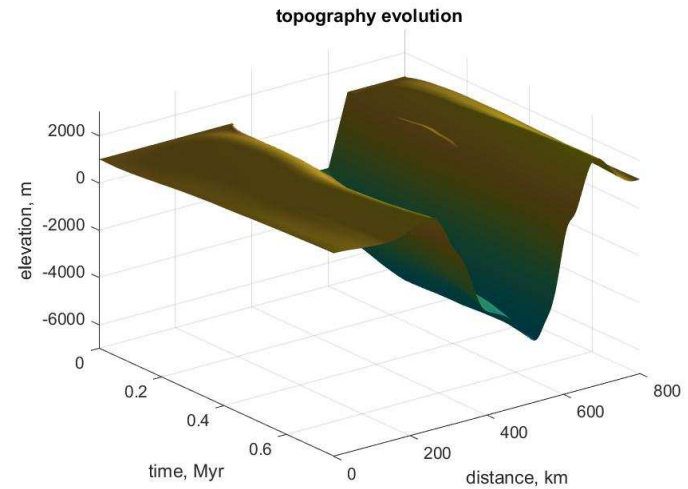
3D

Comienzan a ser notorios los cambios en el relieve en cuanto a deformación se hace referencia, se evidencia la manera en la que converge la placa Nazca en la suramericana, en los desplazamientos se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 272.09 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 472.56 km, en elevaciones máximas es de ≈ 558.82 m.

MODELAMIENTO 0.75338 Ma.



2D



3D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 306.98 Km

Punto nivel del mar derecho: 604.65 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 246.51 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 680.47 Km

Elevación

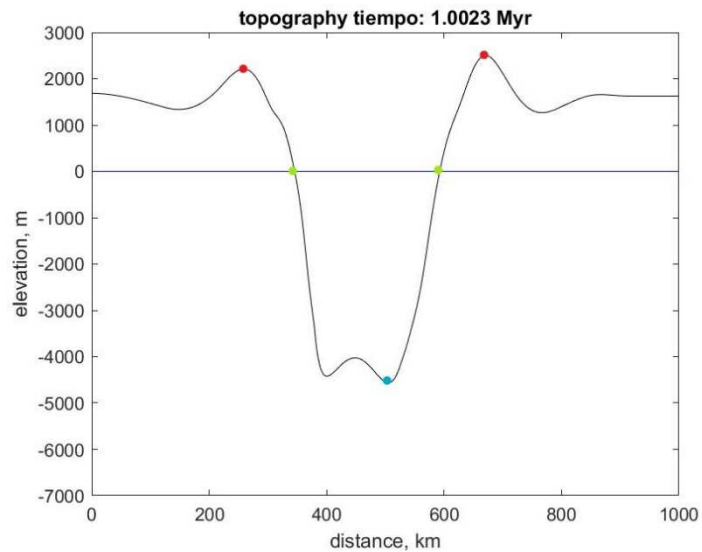
Punto bajo el nivel del mar: -4411.76 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2676.47 m

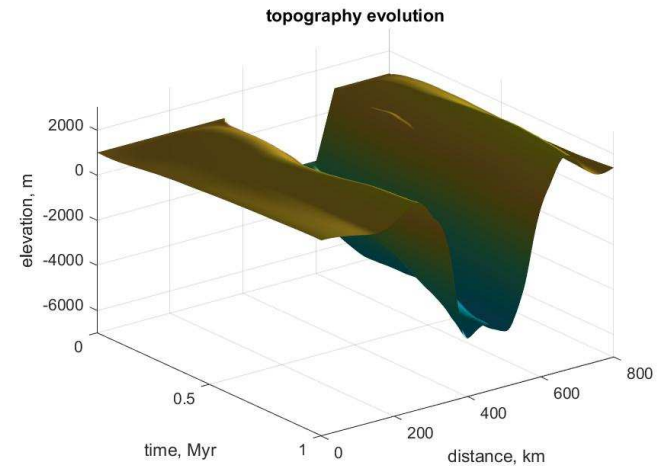
Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2000 m

Las dinámicas de la deformación cada vez se hacen más notorias, se observa la manera en la que converge la placa Nazca en la suramericana, en los desplazamientos se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 297.67 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 433.95 km, en elevaciones máximas es de ≈ 676.47 m.

MODELAMIENTO 1.0023 Ma.



2D



3D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 347.91 Km

Punto nivel del mar derecho: 591.63 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 255.81Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 669.77 Km

Elevación

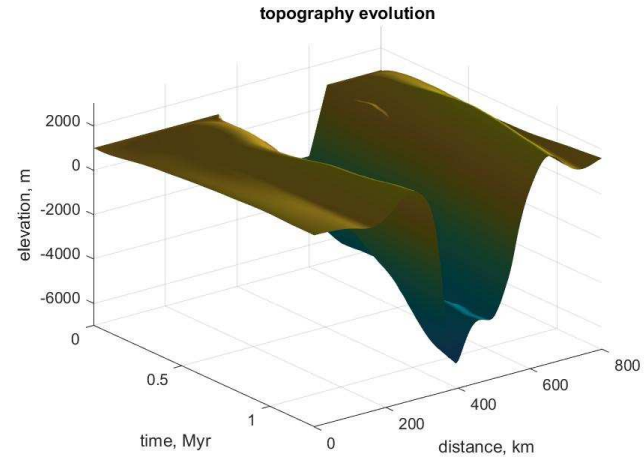
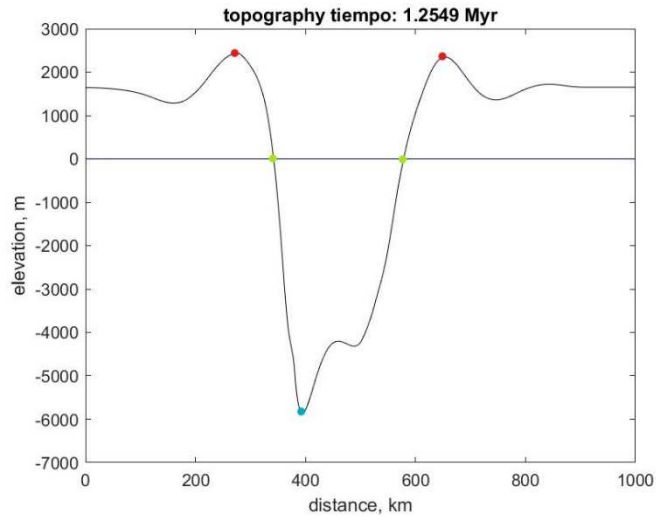
Punto bajo el nivel del mar: - 4764.71m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2176.47 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2529.41 m

Las deformaciones cada vez se tornan más complejas, se crean nuevas curvaturas un ejemplo muy claro es la curvatura pronunciada bajo el nivel del mar, en los desplazamientos se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 243.72 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 413.95 km, en elevaciones máximas es de ≈ 352.94 m.

MODELAMIENTO 1.2549 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 347.91 Km

Punto nivel del mar derecho: 591.63 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 255.81 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 669.77 Km

Elevación

Punto bajo el nivel del mar: 4764.71 m

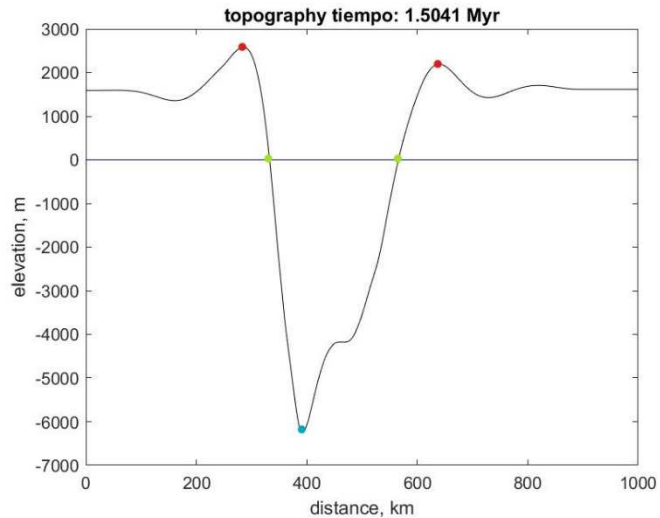
Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2176.47 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2529.41 m

3D

La convergencia de la placa Nazca en la suramericana se torna cada vez más pronunciada, cabe resaltar que en este espacio temporal se evidencia una mayor profundidad bajo el nivel del mar que en la de los años anteriormente analizados, en los desplazamientos se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 237.21 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 361.86 km, en elevaciones máximas es de ≈ 58.82 m.

MODELAMIENTO 1.5041 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 325.58 Km

Punto nivel del mar derecho: 565.12 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 302.33 Km

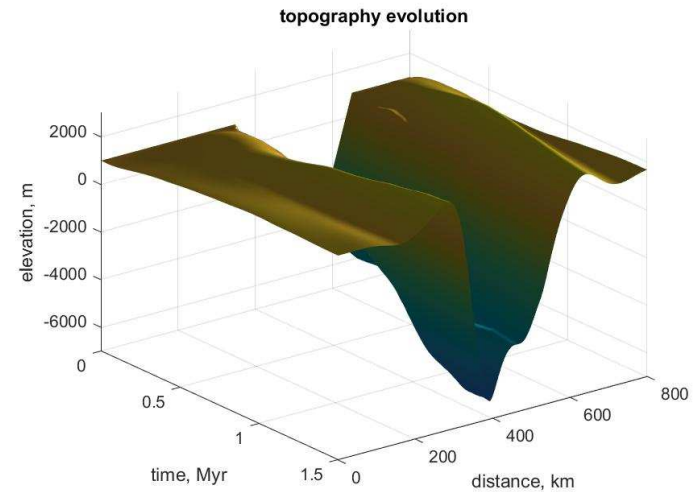
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 632.56 Km

Elevación

Punto bajo el nivel del mar: -6176.47 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2576.47 m

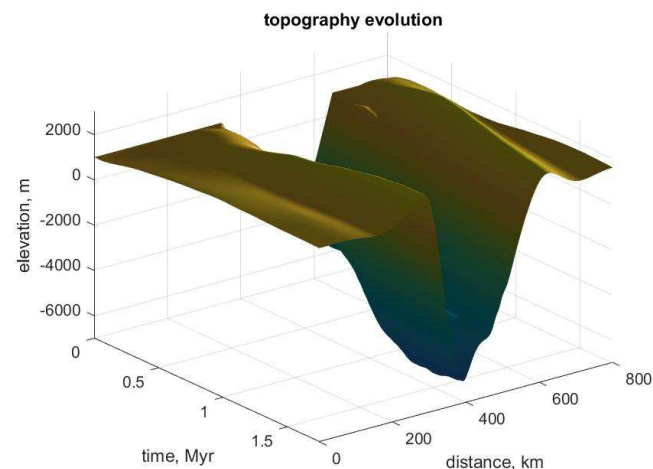
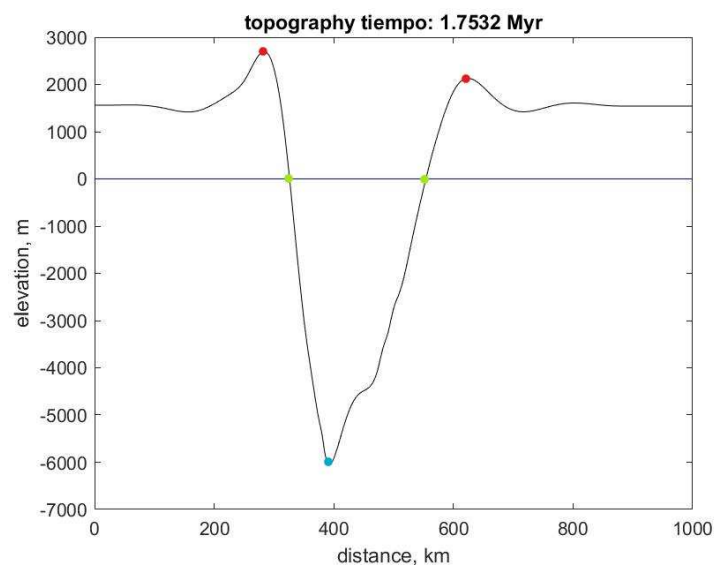
Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2235.29 m



3D

Se siguen evidenciando los cambios, a medida que la placa Nazca converge más en la suramericana, se presenta una mayor deformación en la parte oceánica y continental, en los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 239.53 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 330.23 km, en elevaciones máximas es de ≈ 341.18 m.

MODELAMIENTO 1.7532 Ma.



2D

3D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 325.58 Km

Punto nivel del mar derecho: 553.49 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 258.14 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 622.79 Km

Elevación

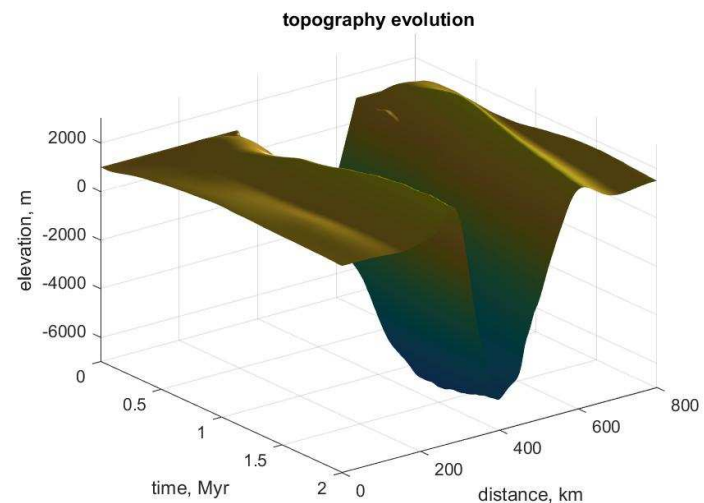
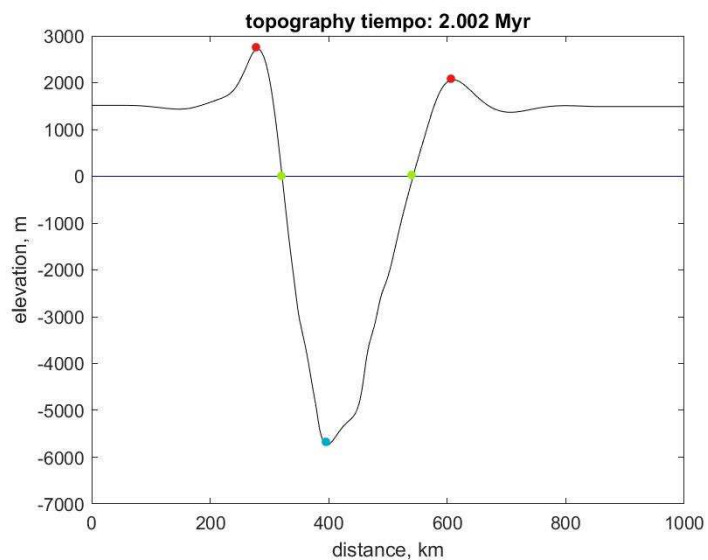
Punto bajo el nivel del mar: -6000.00 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2705.88 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2123.53 m

Con base a lo analizado en los años anteriores, se hace necesario aclarar, que las deformaciones son progresivas en el transcurrir del tiempo, es notorio como la subducción de una placa oceánica en una continental genera consigo la formación de relieve. En los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 227.91 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 364.65 km, en elevaciones máximas es de ≈ 582.35 m.

MODELAMIENTO 2.002 Ma.



2D

3D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 320.93 Km

Punto nivel del mar derecho: 539.53 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 275.35 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 609.30 Km

Elevación

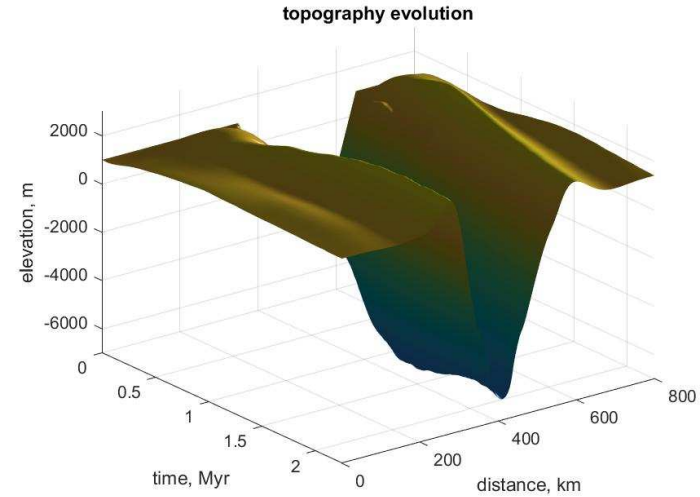
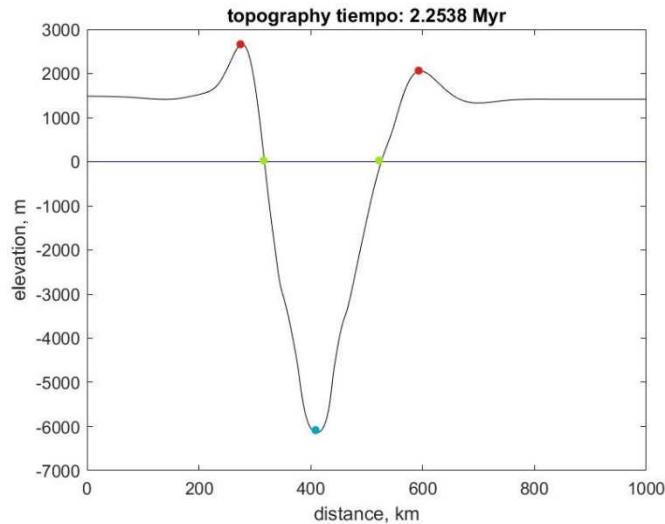
Punto bajo el nivel del mar: - 5705.88 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2735.29 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2117.65 m

En los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 218.60 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 333.95 km, en elevaciones máximas es de ≈ 617.65 m.

MODELAMIENTO 2.2538 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 341.86 Km

Punto nivel del mar derecho: 548.84 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 274.42 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 590.70 Km

Elevación

Punto bajo el nivel del mar: - 6117.65 m

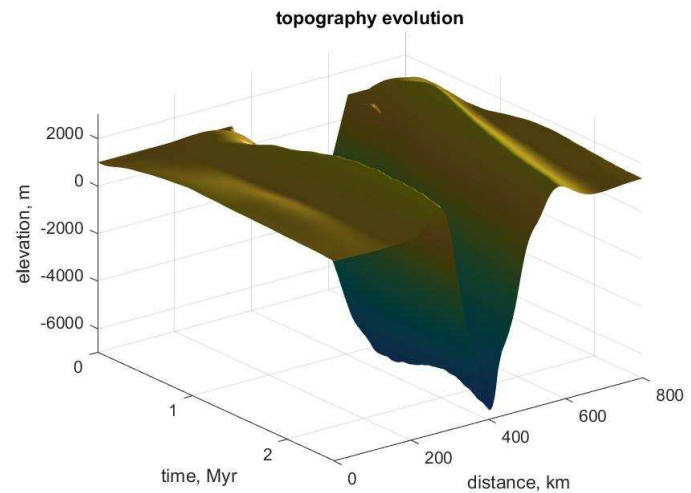
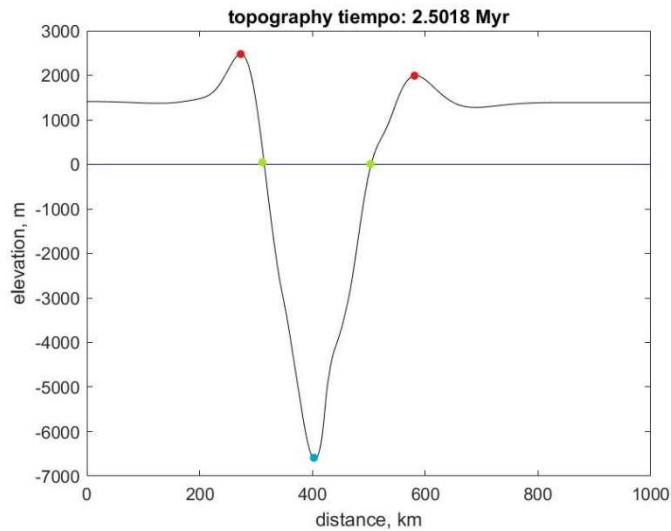
Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2717.65 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2117.65 m

3D

En los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 206.98 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 316.28 km, en elevaciones máximas es de ≈ 600.00 m.

MODELAMIENTO 2.5018 Ma.



2D

3D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 311.63 Km

Punto nivel del mar derecho: 577.21 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 269.77 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 504.65 Km

Elevación

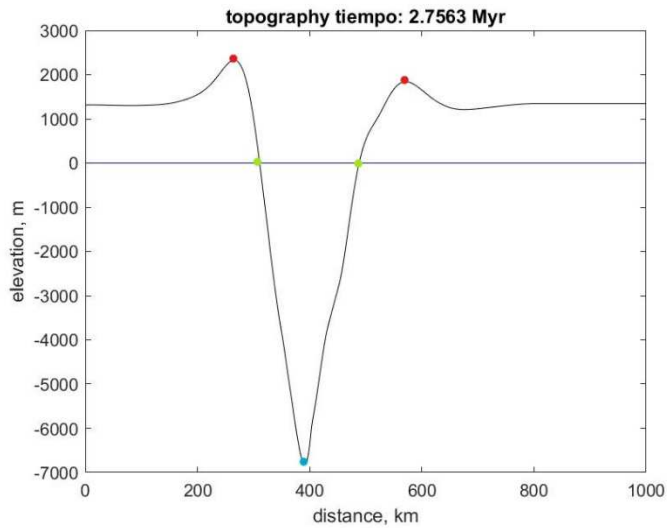
Punto bajo el nivel del mar: 6658.82 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2529.41 m

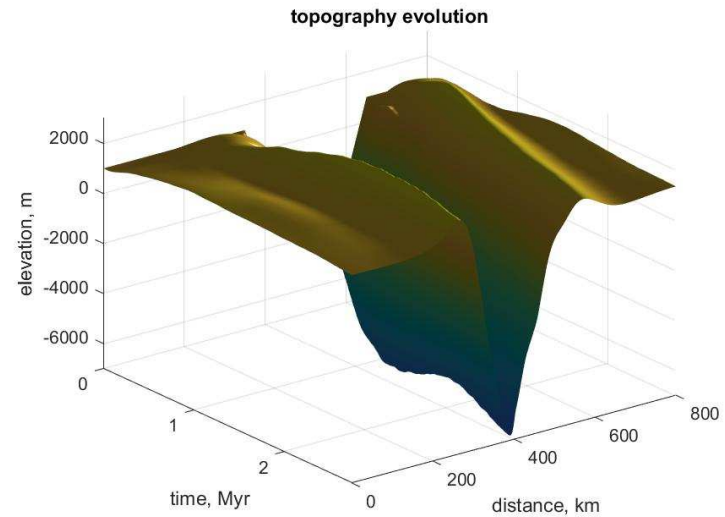
Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 2000.00 m

En este espacio temporal el nivel del mar vuelve a descender, y las alturas de los puntos sobre el nivel del mar también lo hacen, considerando ello como descendencias directamente proporcionales. En los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 265.58 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 234.88 km, en elevaciones máximas es de ≈ 529.41 m.

MODELAMIENTO 2.7563 Ma.



2D



3D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 311.63 Km

Punto nivel del mar derecho: 520.93 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 260.47 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 432.56 Km

Elevación

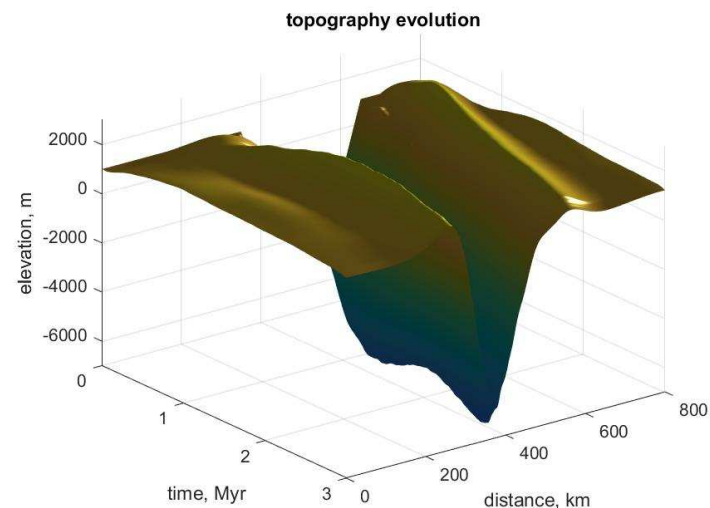
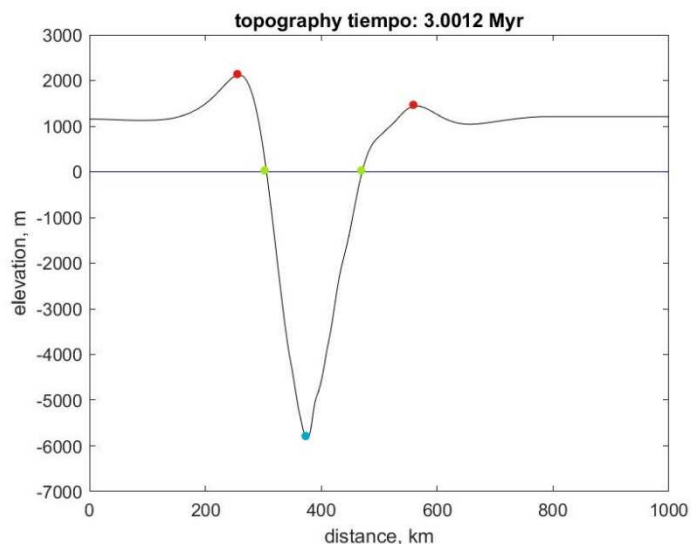
Punto bajo el nivel del mar: -6764.71 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2294.12 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 1911.76 m

Es este tiempo, se sigue presenciando la descendencia de la elevación de la deformación. En los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de $\approx 209.30\text{km}$ y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de $\approx 172.09\text{km}$, en elevaciones máximas es de $\approx 382.35\text{m}$.

MODELAMIENTO 3.0012 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 306.98 Km

Punto nivel del mar derecho: 469.77 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 255.81Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 562.79 Km

Elevación

Punto bajo el nivel del mar: -5764.71 m

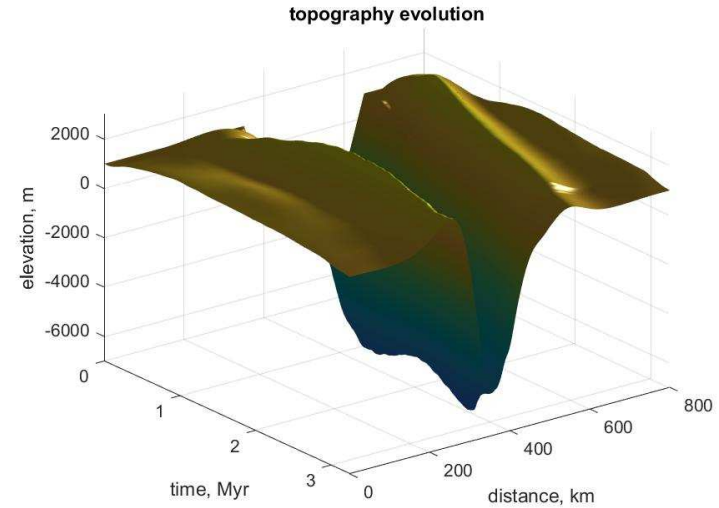
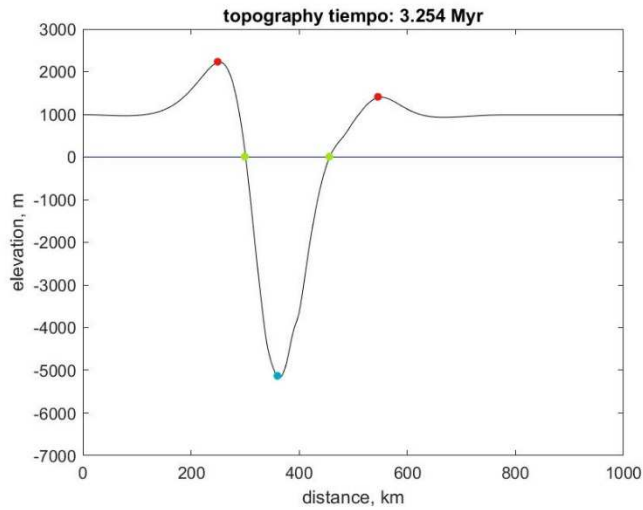
Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2176.47 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 1470.59 m

3D

Aquí se puede analizar que las elevaciones de nuevo comienzan a ascender, se evidencia la manera en la que converge la placa Nazca en la suramericana, en los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de $\approx 162.79\text{km}$ y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de $\approx 306.98\text{km}$, en elevaciones máximas es de $\approx 705.88\text{m}$.

MODELAMIENTO 3.254 Ma.



2D

3D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 302.33 Km

Punto nivel del mar derecho: 451.16 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 246.51 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 548.84 Km

Elevación

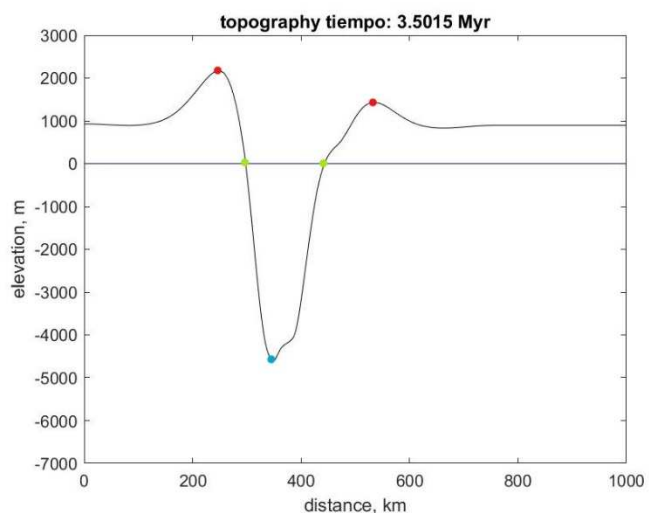
Punto bajo el nivel del mar: -5117.65 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2235.29 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 1470.59 m

En los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 148.84 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 302.33 km, en elevaciones máximas es de ≈ 764.71 m.

MODELAMIENTO 3.5015 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 297.67 Km

Punto nivel del mar derecho: 444.19 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 246.51Km

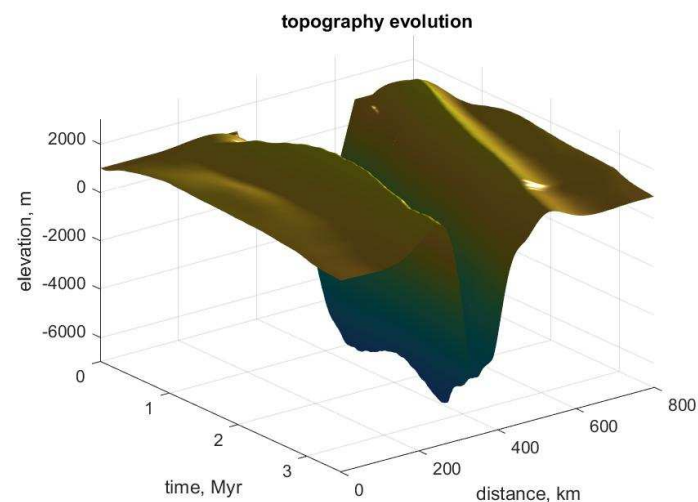
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 525.58 Km

Elevación

Punto bajo el nivel del mar: -4617.65 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2205.88 m

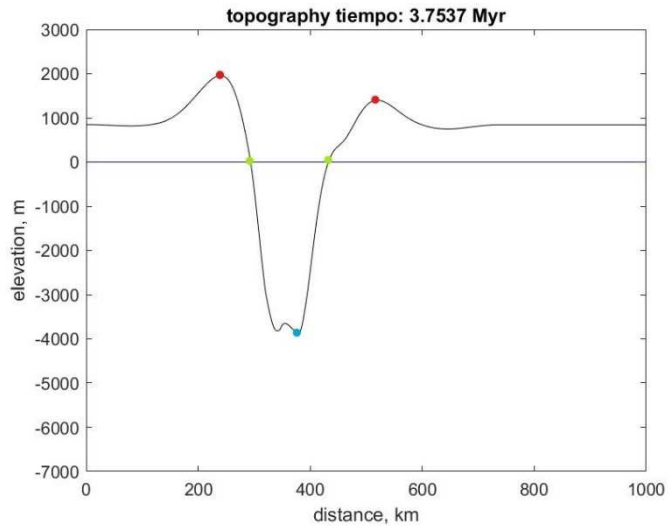
Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 1470.59 m



3D

En los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 146.51 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 279.07 km, en elevaciones máximas es de ≈ 735.29 m.

MODELAMIENTO 3.7537 Ma.



2D

Era: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 293.02 Km

Punto nivel del mar derecho: 423.26 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 237.21 Km

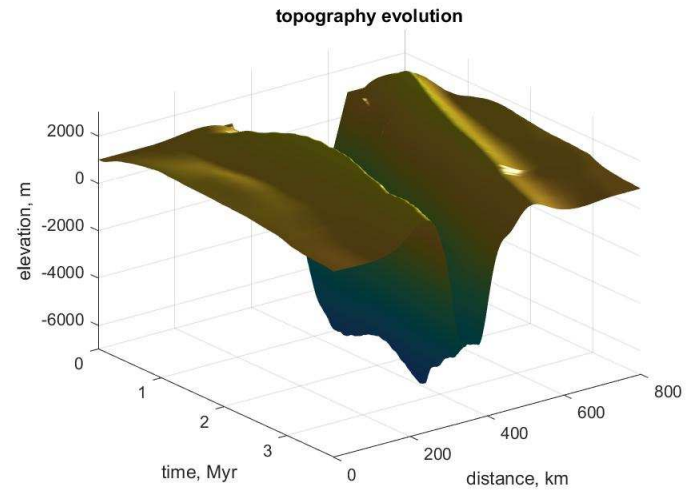
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 511.63 Km

Elevación

Punto bajo el nivel del mar: -3852.94 m

Punto más alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1970.59 m

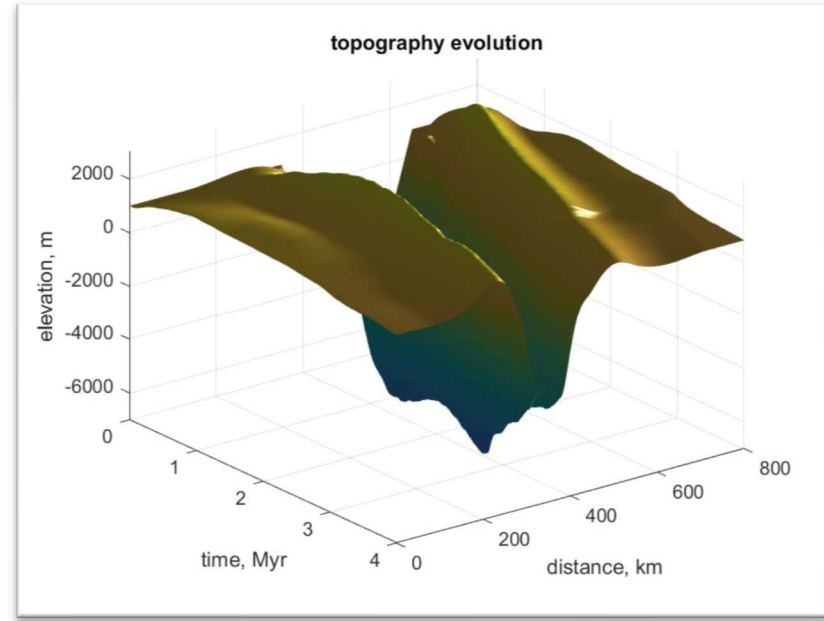
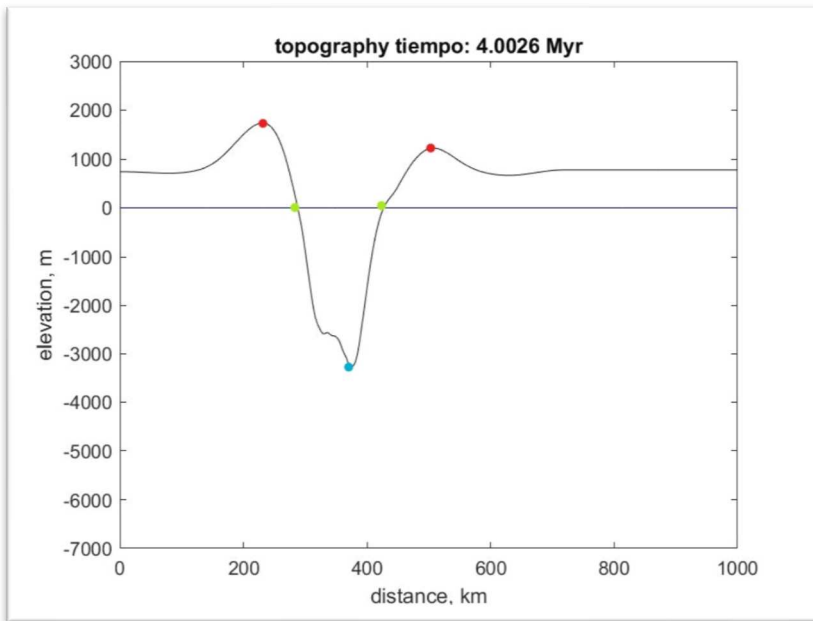
Punto más alto sobre nivel del mar lado derecho: 1470.59 m



3D

Se evidencian las deformaciones en las curvaturas, provocadas por la subducción de la convergencia de la placa Nazca en la suramericana. En los desplazamientos, se puede observar que la distancia de separación entre punto nivel del mar derecho (E) y el punto nivel del mar izquierdo (W) es de ≈ 130.23 km y entre el punto sobre el nivel del mar lado derecho (NE) y el punto sobre el nivel del mar lado izquierdo (NW) es de ≈ 274.42 km, en elevaciones máximas es de ≈ 500.00 m.

MODELAMIENTO 4.0026 Ma.



2D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 288.37 Km

Punto nivel del mar derecho: 427.91 Km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 232.56 Km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 506.98 km

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: -3235 m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1794.12 m

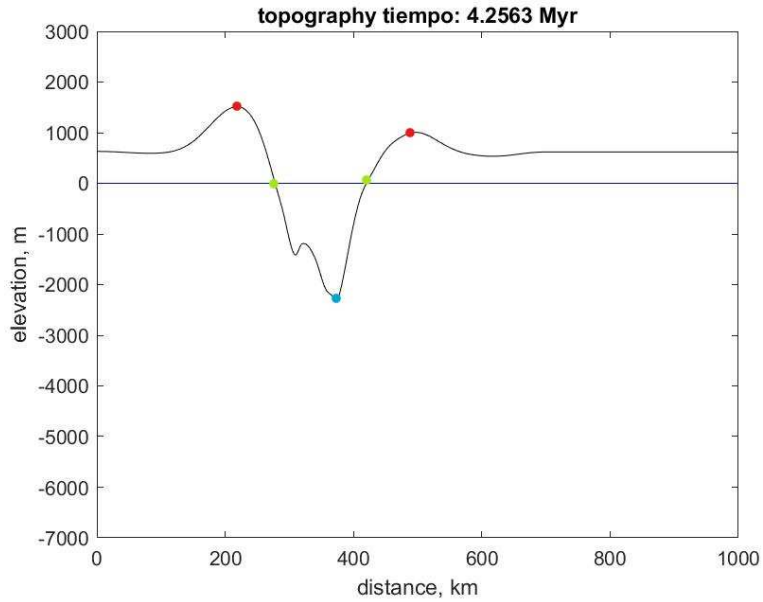
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 1235.29 m

3D

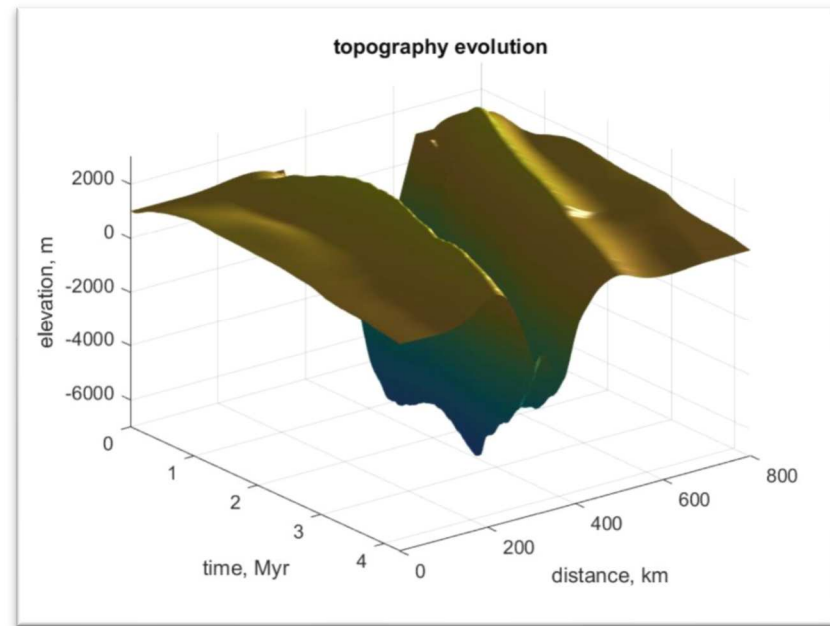
Con base en el análisis numérico obtenido en el modelamiento 2D, se evidencian los cambios generados por la subducción de la placa Nazca en la suramericana.

Se observa que la apertura de los puntos más altos es de 274.42km aproximadamente, mientras que los puntos en el medio del mar su apertura es de ≈ 139.53 km.

MODELAMIENTO 4.2563 Ma.



2D



3D

ERA: Cenozoica

Distancia

Punto nivel del mar izquierdo: 255.81 km

Punto nivel del mar derecho: 418.60 km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 218.60 km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 497.6 7km

Elevación:

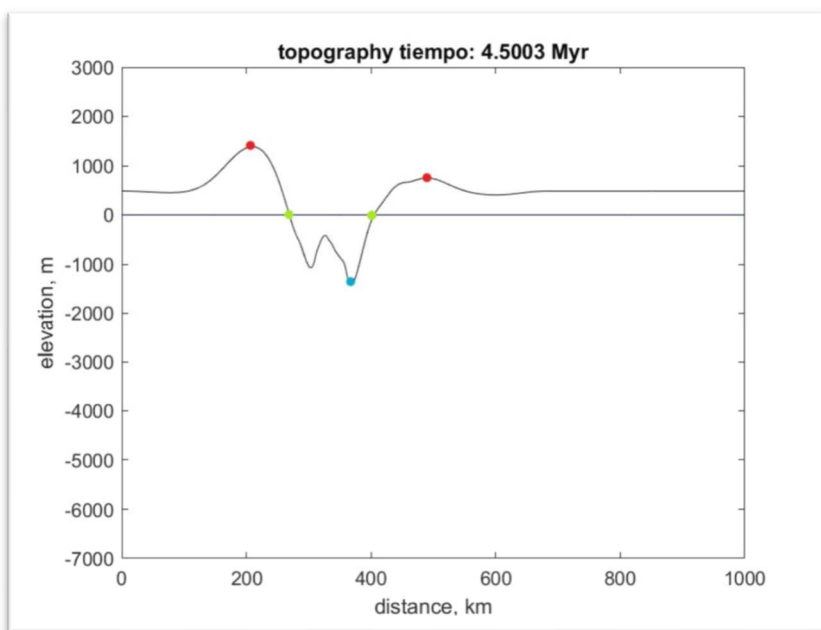
Punto bajo nivel del mar: -2294.12 m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1558.82 m

Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 1058.82 m

Dentro de la deformación encontrada en el modelamiento en 2D se puede observar, que tanto la profundidad y la altura van disminuyendo, la placa Nazca (W) se encuentra cada vez más cerca de la suramericana (E) y la fisura que se encuentra entre estas se va cerrando cada vez más, en comparación a los modelos anteriores, se evidencia que la apertura entre los puntos más altos se encuentran alrededor de a una distancia de ≈ 279.07 km y la apertura entre los puntos que se encuentran en el medio del mar es de ≈ 162.79 km.

MODELAMIENTO 4.5003 Ma.



2D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 269.77km

Punto nivel del mar derecho: 405.58km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 209.30km

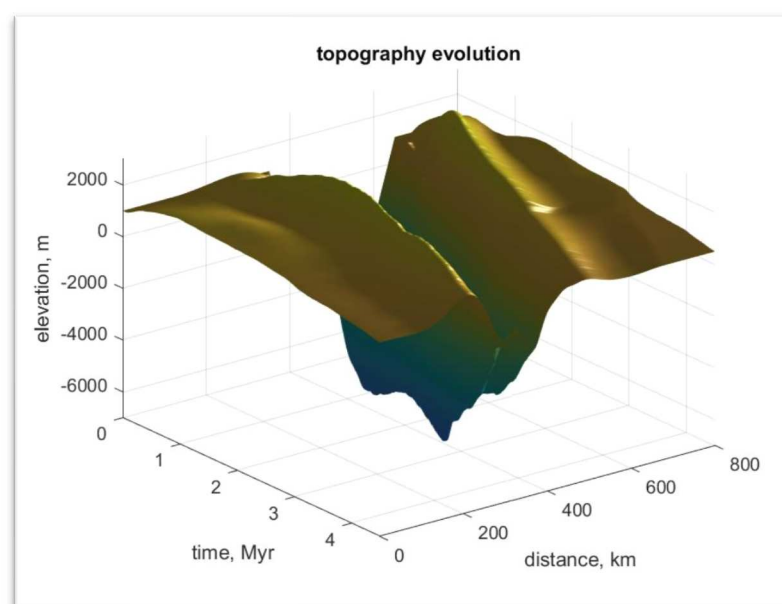
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 483.72km

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: -1417.65m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1411.76m

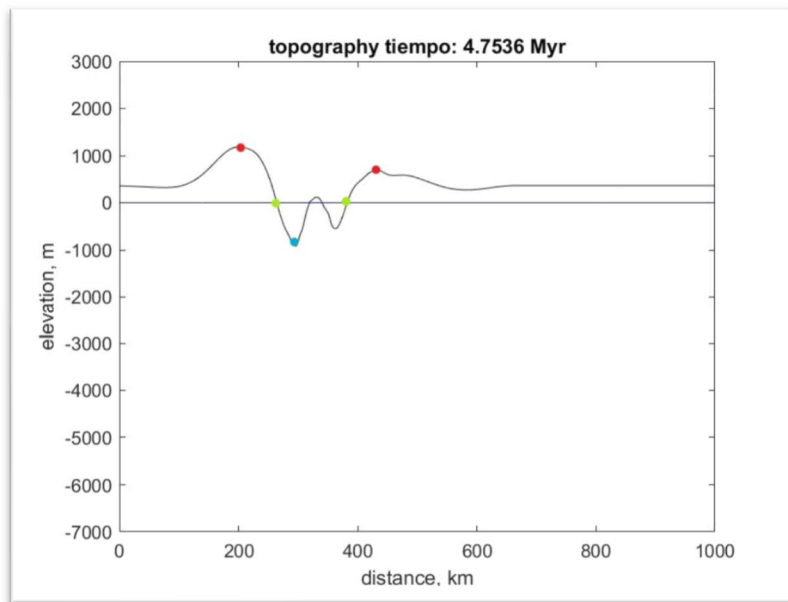
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 764.71m



3D

En el análisis de la gráfica en 2D, se encuentra una pequeña inflexión la cual va emergiendo de las profundidades del mar y se evidencia que es más grande a comparación de la gráfica anterior, dentro de los análisis, se toma el punto más profundo del modelamiento y la apertura de los puntos más altos de la ilustración entre las placas Nazca (W) y la suramericana (E) se encuentran a $\approx 274.42\text{km}$ mientras que los puntos medios se encuentran a $\approx 135.82\text{km}$.

MODELAMIENTO 4.7536 Ma.



2D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 264.19km

Punto nivel del mar derecho: 379.07km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 200.00km

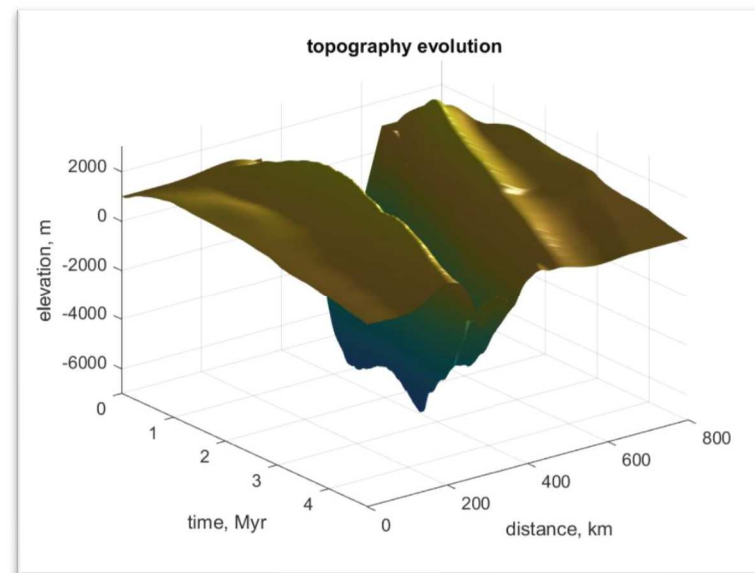
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 432.56km

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: -941.18m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1235.29m

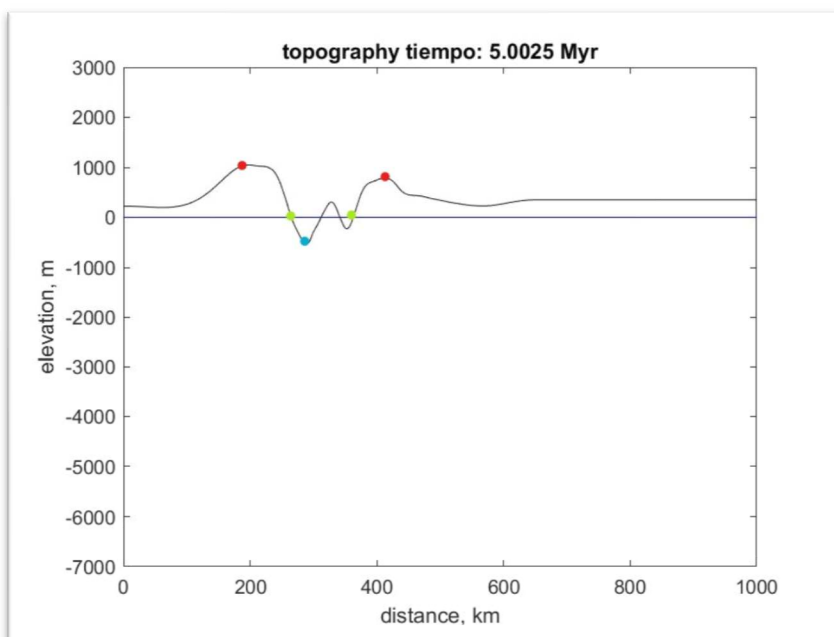
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 705.88m



3D

En el modelamiento, se evidencia que la inflexión de la ilustración en 2D anterior va saliendo a la superficie y de la grieta que antes existía, va surgiendo una pequeña isla el punto más alto de la placa Nazca (W) se ha reducido considerablemente mientras que el de la placa suramericana se reduce más lentamente, de la apertura entre los puntos más altos se puede observar que hay una distancia de $\approx 232.56\text{km}$ y de los puntos medios del mar hay $\approx 114.88\text{km}$.

MODELAMIENTO 5.0025 Ma.



2D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 341.86km

Punto nivel del mar derecho: 362.79km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 195.35km

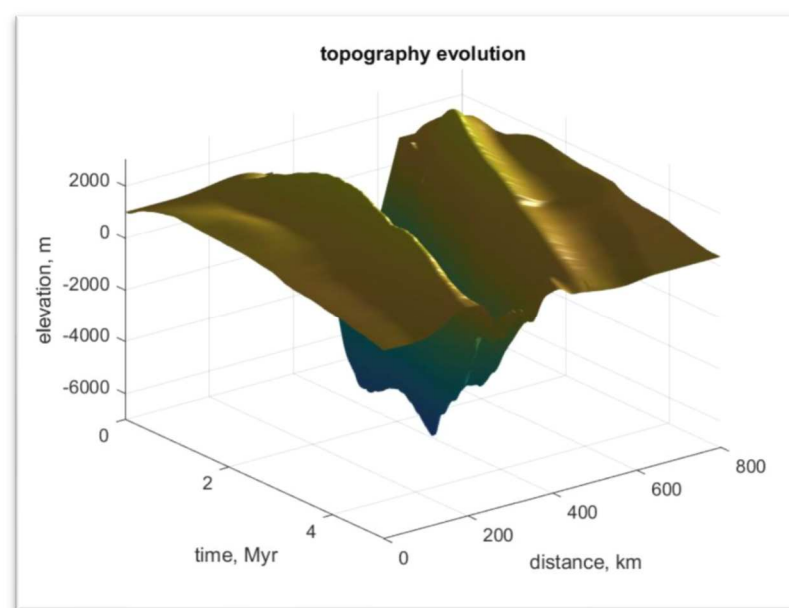
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 413.95km

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: -517.65m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1088.24m

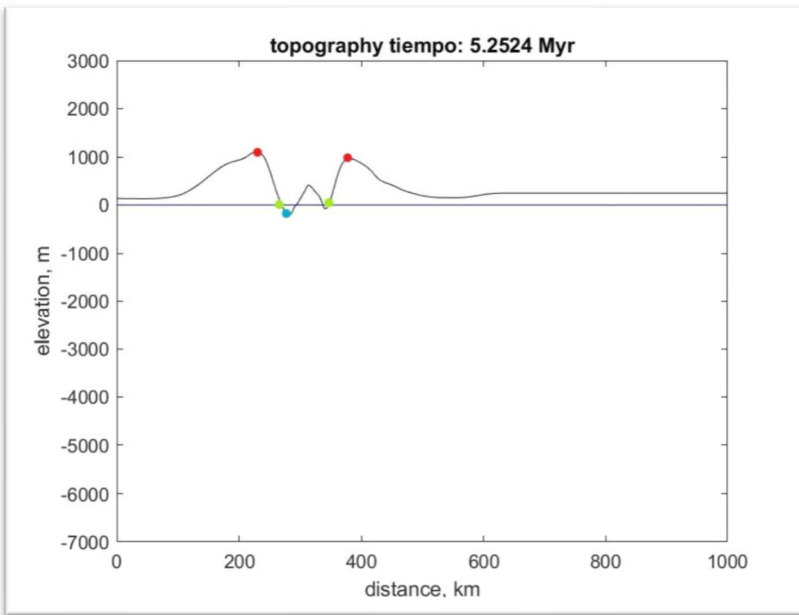
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 823.53m



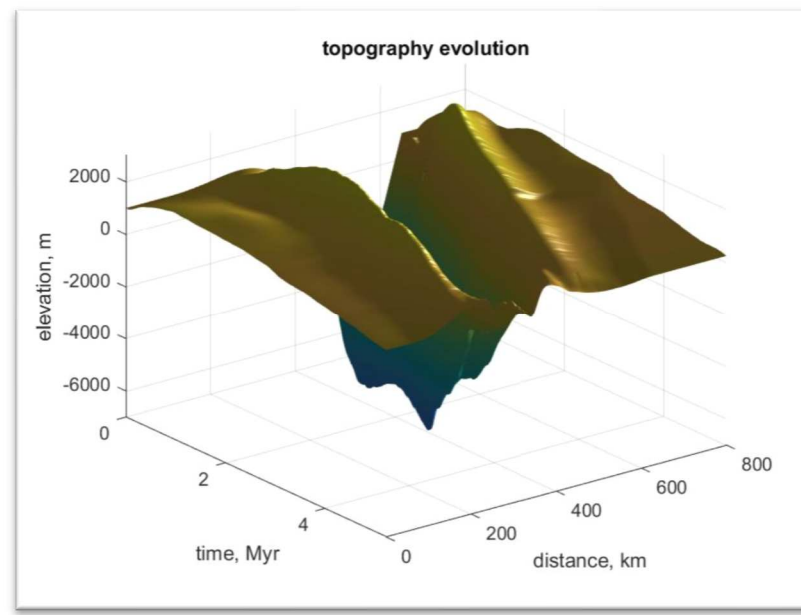
3D

Dentro del análisis de la ilustración en 2D, se evidencia la unión que va surgiendo entre las dos placas Nazca (W) y suramericana (E), los cambios en la profundidad son drásticos a comparación de los modelamientos anteriores, la distancia entre los puntos más altos de este es de $\approx 218.60\text{km}$ mientras que la distancia entre los puntos medios del mar se ha reducido a $\approx 20.93\text{km}$.

MODELAMIENTO 5.2524 Ma.



2D



3D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 273.49km

Punto nivel del mar derecho: 348.84km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 227.91km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 337.67km

Elevación:

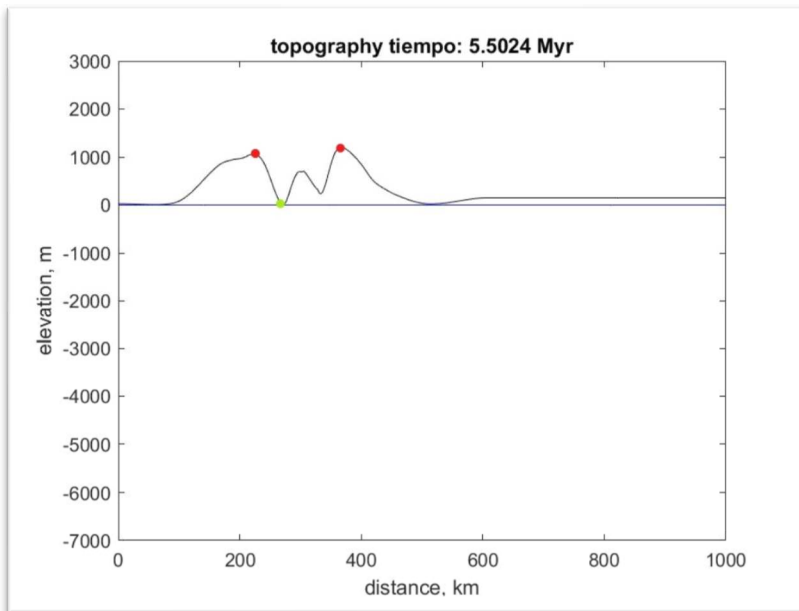
Punto bajo nivel del mar: -200m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1105.88m

Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 929.41m

Para esta época, se puede diferenciar de las temporadas anteriores que la inflexión tiene ya un volumen de tierra conformado. La separación que antes existía, ahora está interceptada por una isla; dentro del análisis, el modelamiento se va corriendo hacia la placa suramericana (E) generando así nuevos volúmenes de tierra, el punto más alto de la placa Nazca vuelve a crecer pero el movimiento continuo hacia el Este hace que este punto se vaya volviendo parte de la placa suramericana, la apertura de los puntos más altos se encuentran alrededor de los ≈ 149.77 km y de los puntos a nivel del mar, ahora con un volumen de tierra en el medio es de ≈ 75.35 km

MODELAMIENTO 5.5024 Ma.



2D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 227.91km

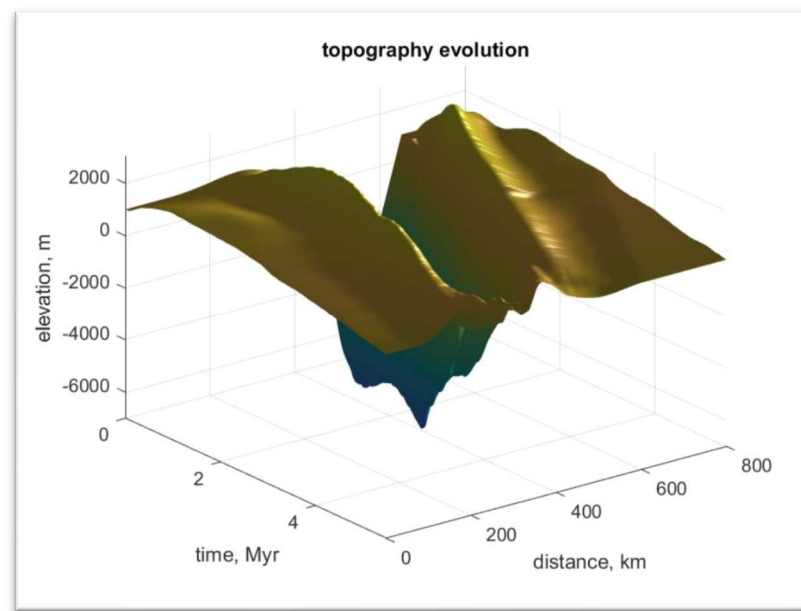
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 367.44km

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: 0.00

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1058.82m

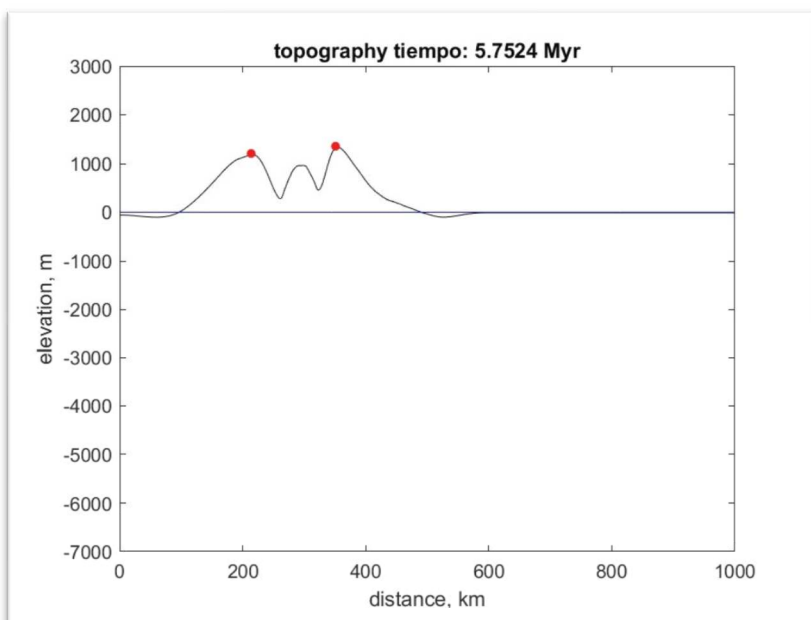
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 1205.88m



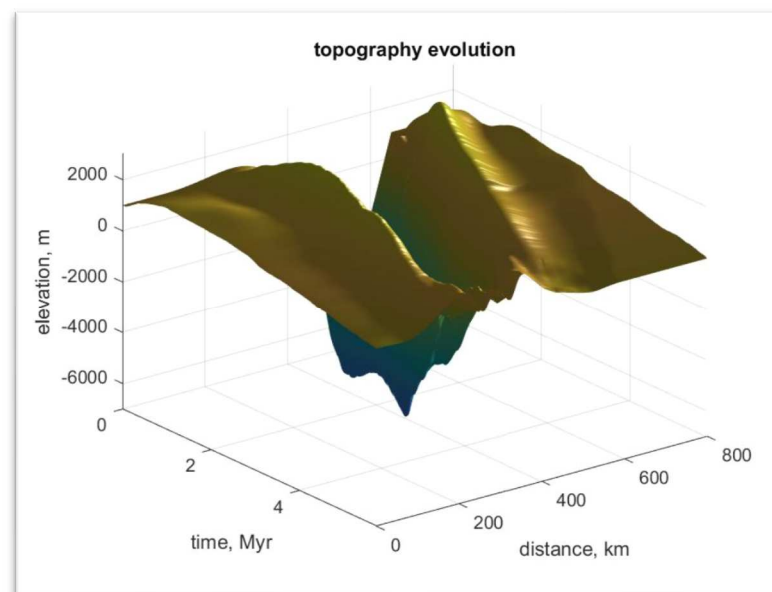
3D

En este modelamiento, se puede observar que ya no hay puntos en el medio del mar y esto se debe a que el constante movimiento de los fluidos viscosos de la tierra dirigiéndose al Este, hizo que las placas se unieran en una sola, y generaran un solo volumen de roca. Este volumen seguirá corriendo hacia la placa suramericana (E) y generará nuevas deformaciones, la distancia entre los puntos más altos de este nuevo volumen de roca se encuentra alrededor de los ≈ 159.53 km

MODELAMIENTO 5.7524 Ma.



2D



3D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 493.02km

Punto nivel del mar derecho: 0.00

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 353.49km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 0.00

Elevación:

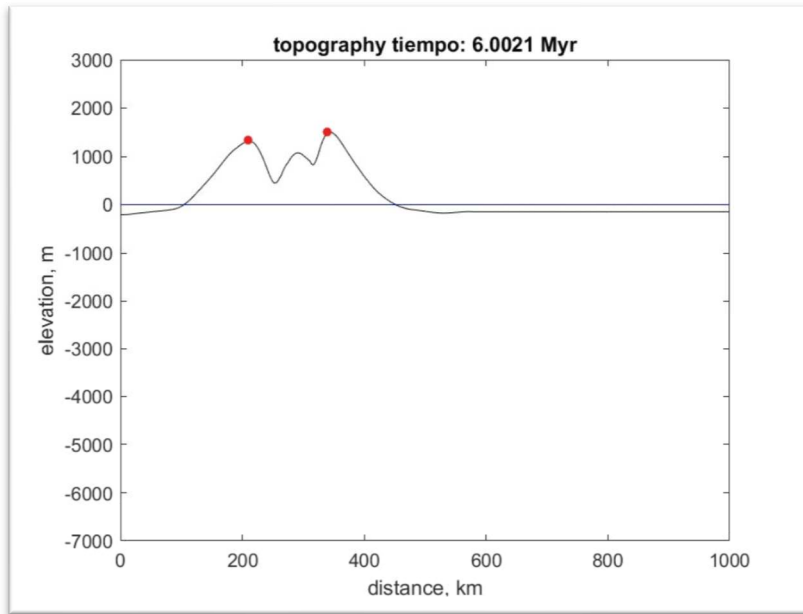
Punto bajo nivel del mar: 0.00

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1294.12m

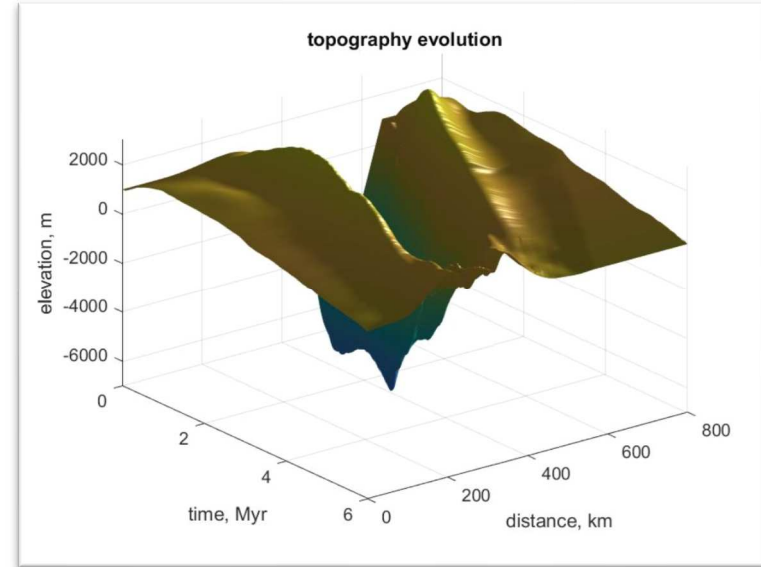
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 0.00

A partir de este modelamiento, se observa que la capa de tierra estimada del modelamiento anterior vuelve a sumergirse dentro del mar, provocando un nuevo punto bajo el nivel del mar, mientras que los puntos más altos de las placas van aumentando su volumen de roca y van generando nuevos levantamientos.

MODELAMIENTO 6.0021 Ma.



2D



3D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 432.56km

Punto nivel del mar derecho: 0.00

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 339.53km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 0.00

Elevación:

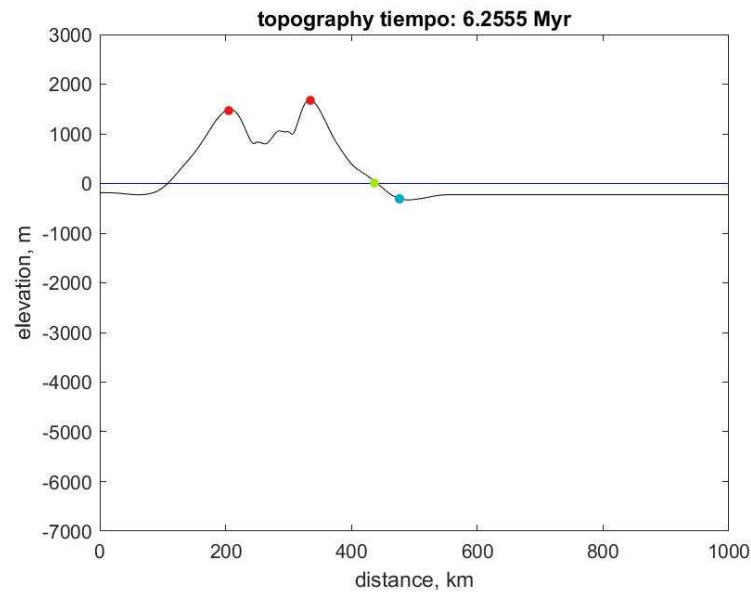
Punto bajo nivel del mar: 0.00

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1517.65m

Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 0.00

En el modelamiento, se observa que la placa nazca (W) se va sumergiendo más bajo el nivel del mar y los desplazamientos de roca fundida en el interior de esta siguen en curso hacia la placa suramericana, dentro de la roca fundida se pueden encontrar lavas basálticas y rocas sedimentarias, estas ayudan a nuevas deformaciones.

MODELAMIENTO 6.2555 Ma.



2D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 442.79km

Punto nivel del mar derecho: 0.00

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 334.88km

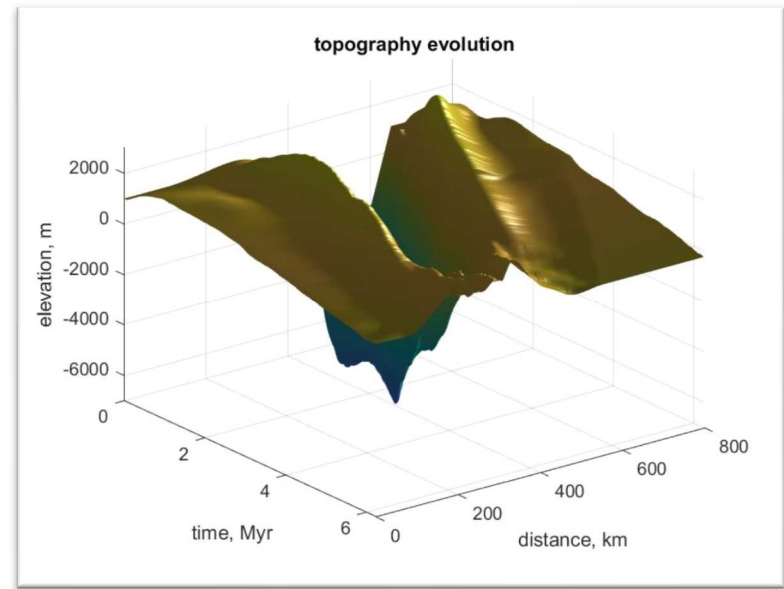
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 0.00

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: -341.18m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1705.88m

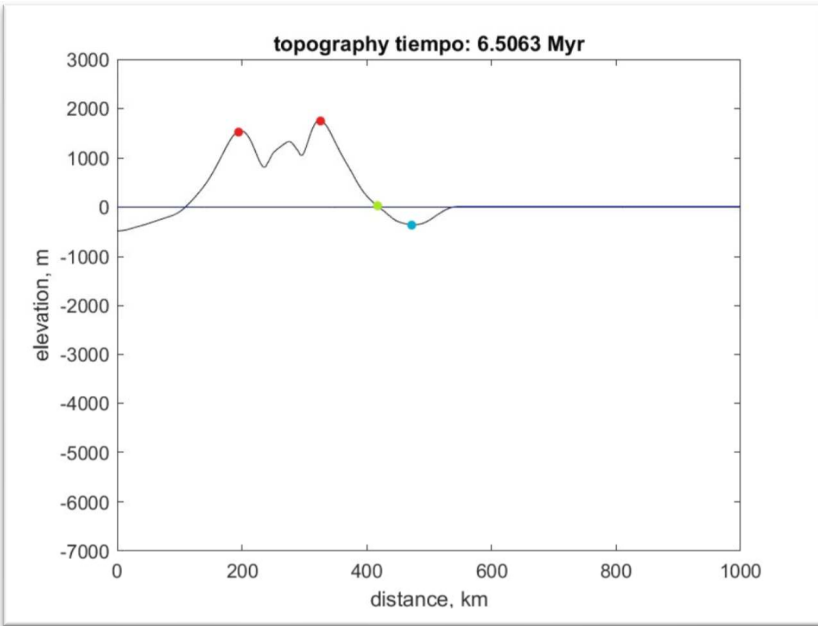
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 0.00



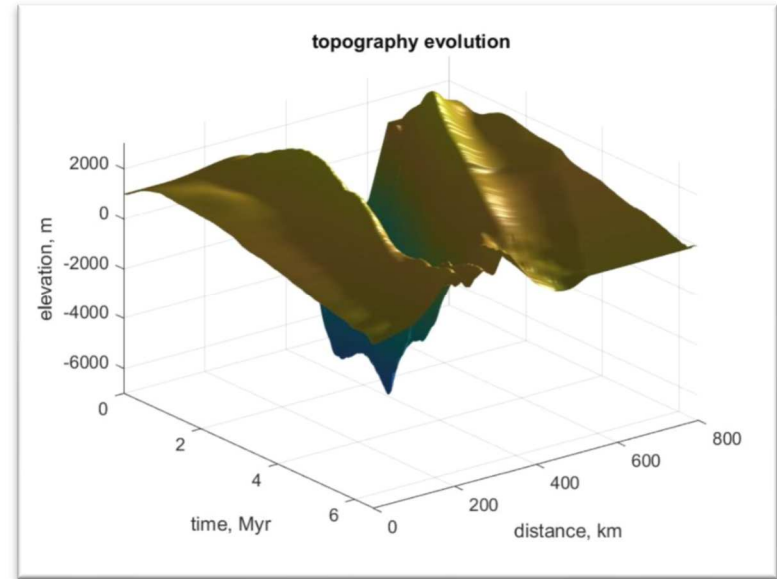
3D

En el modelamiento, se puede observar que la placa Nazca produce un nuevo punto bajo el nivel del mar más profundo, en este modelamiento sólo se tuvo en cuenta una sola altura ya que el punto alto perteneciente a la placa Nazca(W) para esta época ya hace parte de la placa suramericana (E).

MODELAMIENTO 6.5063 Ma.



2D



3D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 418.60km

Punto nivel del mar derecho: 0.00

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 325.58km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 0.00

Elevación:

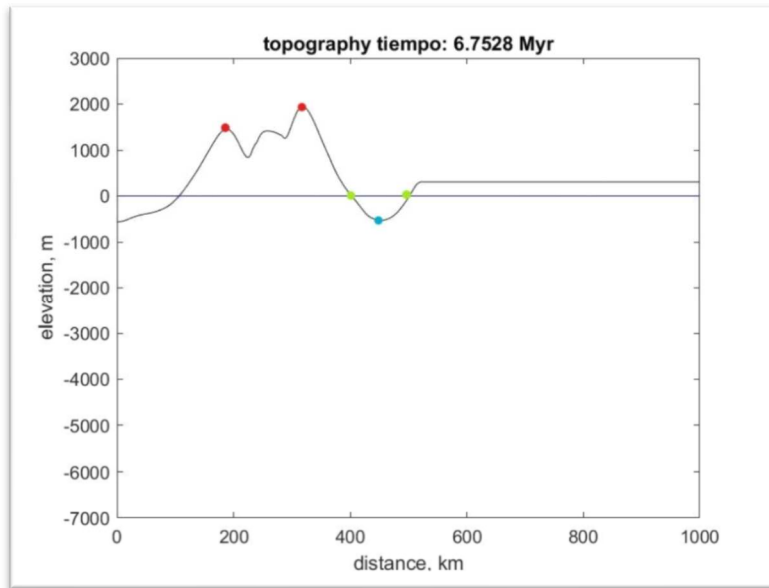
Punto bajo nivel del mar: -329.41m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1811.76m

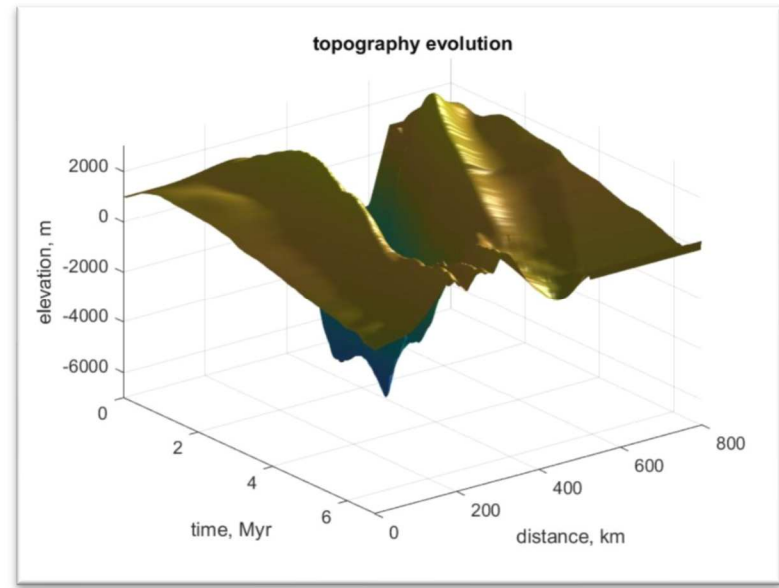
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 0.00

Dentro de esta ilustración en 2D, se puede apreciar que la placa Nazca (W) va ganando altura y la deformación, en la derecha va tomando un perfil muy parecido al que sucedía al principio del modelamiento, en donde la placa Nazca tenía una curva pronunciada.

MODELAMIENTO 6.7528 Ma.



2D



3D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 400km

Punto nivel del mar derecho: 502.33km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 293.02km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 523.26km

Elevación:

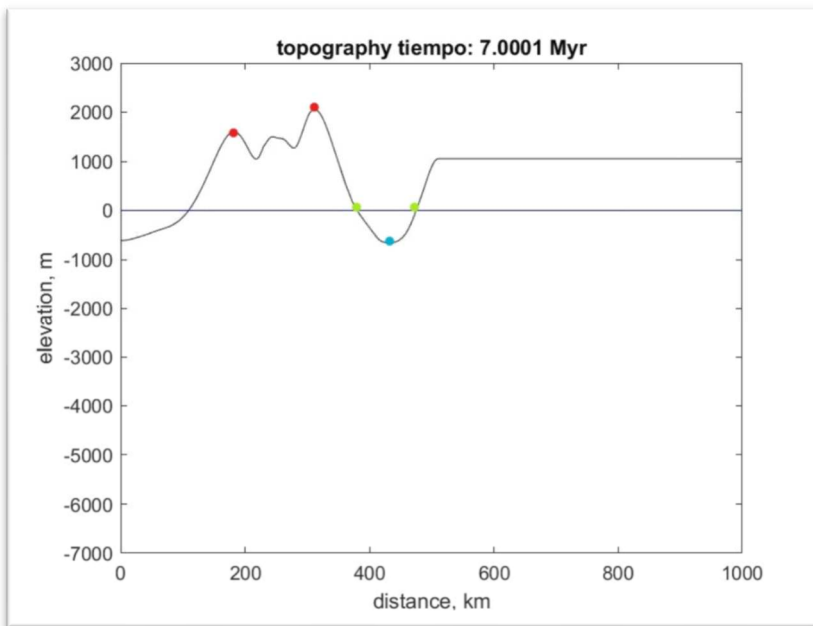
Punto bajo nivel del mar: -529.41m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 1941.18m

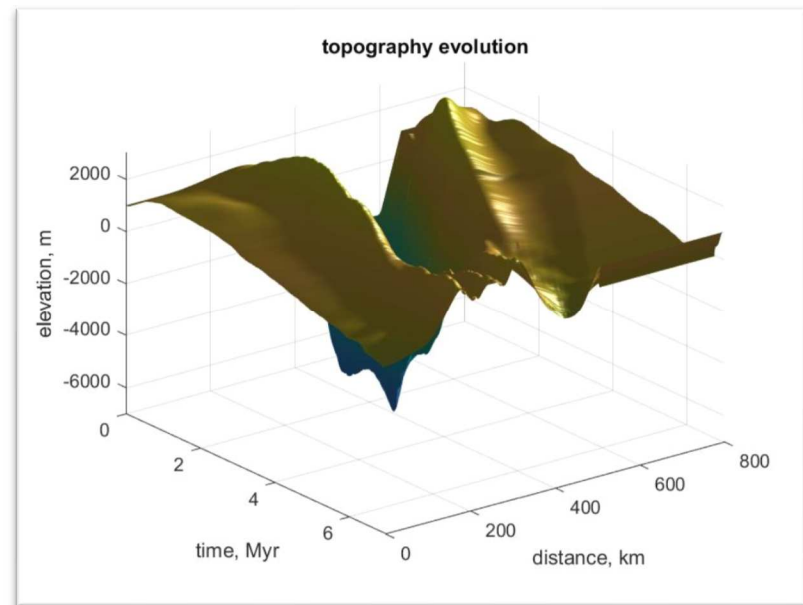
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 294.12m

A partir de este modelamiento, se genera una nueva apertura entre puntos altos de la placa Nazca (W) y la suramericana (E), esto se debe a que la placa Nazca retoma una nueva deformación en la que se genera un nuevo volumen de roca sólida, pero internamente el magma va en dirección al Este, se evidencia que la apertura entre los puntos más altos se encuentra en ≈ 230.30 km y la apertura entre los puntos en el medio del mar está en ≈ 102.33 km.

MODELAMIENTO 7.0001 Ma.



2D



3D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 781.40 km

Punto nivel del mar derecho: 470.7km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 311.63km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 511.63km

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: -635.29m

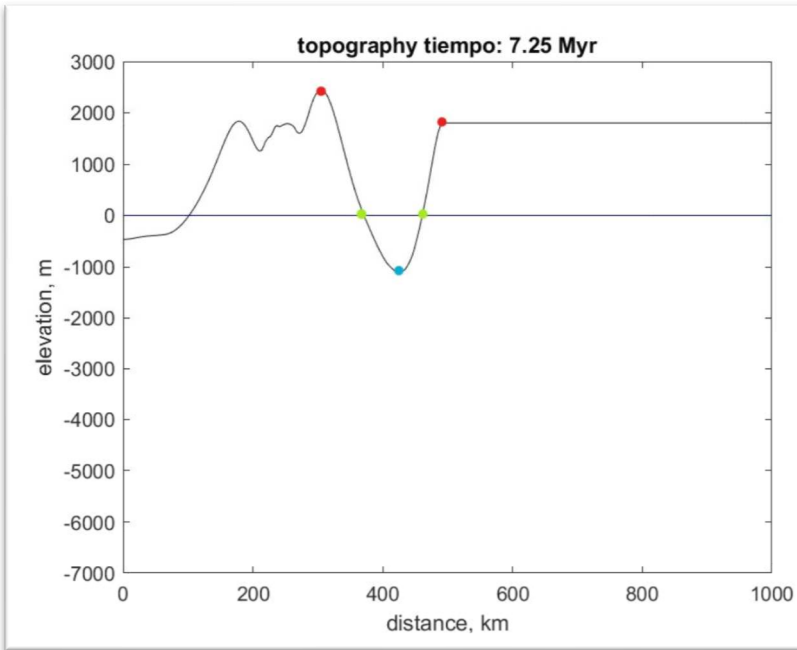
Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2058.82m

Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 1058.82m

En el modelamiento actual, se deforma la placa Nazca (W) adquiriendo más volumen de roca mesozoica, mientras que en la placa suramericana (E) va adquiriendo más altura a comparación de la ilustración anterior.

La apertura que se encuentra entre los puntos más altos está alrededor de los ≈ 200.00 km, mientras que en los puntos medios hay una apertura de ≈ 89.30 km.

MODELAMIENTO 7.25 Ma.



2D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 367.44km

Punto nivel del mar derecho: 455.81km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 306.05km

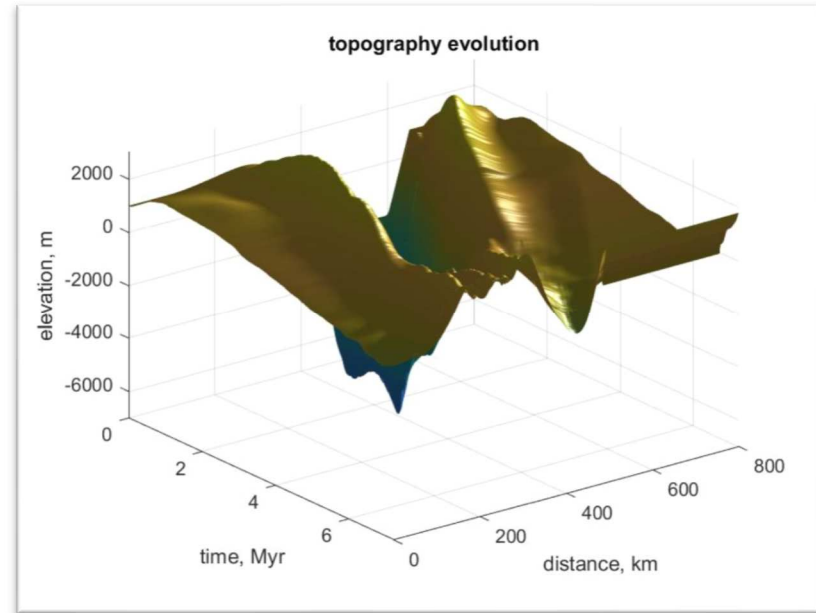
Punto sobre nivel del mar lado derecho: 483.72km

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: -1117.65m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2441.18m

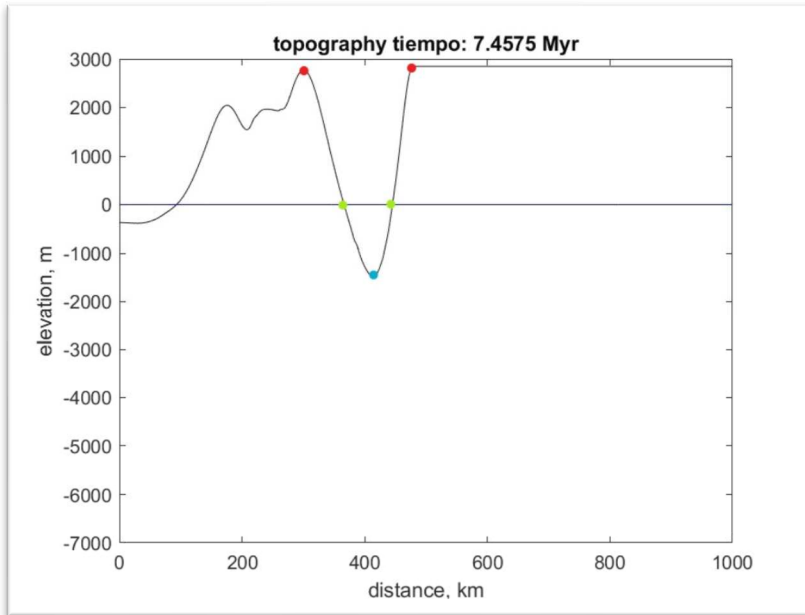
Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 1870.59m



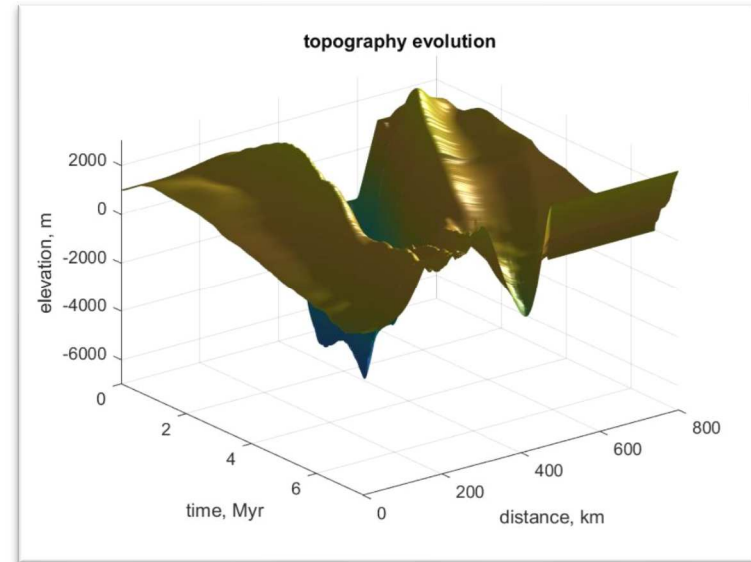
3D

Dentro del análisis de esta ilustración en 2D, se observa que la profundidad del punto más bajo es más evidente y que los puntos más altos de las dos placas, tanto de la Nazca (W) como de la suramericana (E) van aumentando su volumen y su altura, la apertura entre estos puntos altos es de ≈ 177.67 km mientras que la apertura de los puntos medios es de ≈ 87.37 km.

MODELAMIENTO 7.4575 Ma.



2D



3D

ERA: Cenozoica

Distancia:

Punto nivel del mar izquierdo: 363.72km

Punto nivel del mar derecho: 419.53km

Punto sobre nivel del mar lado izquierdo: 297.67km

Punto sobre nivel del mar lado derecho: 520.93km

Elevación:

Punto bajo nivel del mar: 1470.59m

Punto alto sobre nivel del mar lado izquierdo: 2764.71m

Punto alto sobre nivel del mar lado derecho: 2882.35m

Luego del análisis de la imagen en 2D, se concluye que la altura obtenida en la placa Nazca (W) vuelve a enterrar dentro la suramericana (E) debido al flujo del material viscoso que transita al interior de las mismas, se evidencia que en el modelamiento, las alturas y profundidades siguen variando en un ciclo permanente y las aperturas se cierran y se generan nuevas, el material siempre tiene una dirección constante hacia el Este, la apertura de la ilustración actual de los puntos altos es de $\approx 223.26\text{km}$ y la apertura de los puntos medios es de $\approx 55.81\text{km}$.

Dentro del análisis de resultados, se realiza la siguiente tabla resumen, en donde se implementan los cálculos de las distancias aproximadas que ocurren en los puntos que se encuentran a nivel del mar y sobre el nivel del mar los puntos más altos, en las elevaciones se toma la distancia que hay entre el punto más alto y el punto más bajo.

Ma.	Punto-N_M	Punto-N_M_I	Dist_N_M	Punto_Alto_I	Punto_Alto_D	Dist_P_A	PBNM	PASNMI	PASNMD	PA+PB
0.005	363.72	632.56	268.84	651.16	344.19	306.97	2000.00	1000.00	1000.00	3000.00
0.254	367.44	618.60	251.16	251.16	720.93	469.77	4147.06	1529.41	1794.12	5941.18
0.505	353.49	625.58	272.09	234.42	706.98	472.56	4352.94	1676.47	2235.29	6588.23
0.753	306.98	604.65	297.67	246.51	680.47	433.96	4411.76	2676.47	2000.00	7088.23
1.002	347.91	591.63	243.72	255.81	669.77	413.96	4764.71	2176.47	2529.41	7294.12
1.255	399.53	576.74	177.21	293.49	655.35	361.86	5764.71	2411.76	2352.94	8176.47
1.504	325.58	565.12	239.54	302.33	632.56	330.23	6176.47	2576.47	2235.29	8752.94
1.753	325.58	553.49	227.91	258.14	622.79	364.65	6000.00	2705.88	2123.53	8705.88
2.002	320.93	539.53	218.60	275.35	609.30	333.95	5705.88	2735.29	2117.65	8441.17
2.254	341.86	548.84	206.98	274.42	590.70	316.28	6167.65	2717.65	2117.65	8885.30
2.502	311.63	577.21	265.58	269.77	504.65	234.88	6658.82	2529.41	2000.00	9188.23
2.756	311.63	520.93	209.30	260.47	432.56	172.09	6764.71	2294.12	1911.76	9058.83
3.001	306.98	469.77	162.79	255.81	562.79	306.98	5764.71	2176.47	1470.59	7941.18
3.254	302.33	451.16	148.83	246.51	548.84	302.33	5117.65	2235.29	1470.59	7352.94
3.502	297.67	444.19	146.52	246.51	525.58	279.07	4617.65	2205.88	1470.59	6823.53
3.754	293.02	423.26	130.24	237.21	511.63	274.42	3852.94	1970.59	1470.59	5823.53
4.003	288.37	427.91	139.54	232.56	506.98	274.42	3235.29	1794.12	1235.29	5029.41
4.256	255.81	418.60	162.79	218.60	497.67	279.07	2294.12	1558.82	1958.82	4252.94
4.500	269.77	405.58	135.81	209.30	283.72	74.42	1417.65	1411.76	764.71	2829.41
4.754	264.19	379.07	114.88	200.00	432.56	232.56	941.18	1235.29	705.88	2176.47
5.003	341.86	362.79	20.93	195.35	413.95	218.60	517.65	1088.24	823.53	1605.89
5.252	273.49	348.84	75.35	227.91	377.67	149.76	200.00	1105.88	929.41	1305.88
5.502	0.00	0.00	0.00	227.91	367.44	139.53	0.00	1058.82	1205.88	1205.88
5.752	493.02	0.00	493.02	453.49	0.00	453.49	0.00	1294.12	0.00	1294.12
6.002	432.56	0.00	432.56	339.53	0.00	339.53	0.00	1517.65	0.00	1517.65
6.256	442.79	0.00	442.79	334.88	0.00	334.88	341.18	1705.88	0.00	2047.06
6.506	418.60	0.00	418.60	325.58	0.00	325.58	329.41	1811.76	0.00	2141.17
6.753	400.00	502.33	102.33	293.02	523.26	230.24	529.41	1941.18	294.12	2470.59
7.001	381.40	470.70	89.30	311.63	511.63	200.00	635.29	2058.82	1058.82	2694.11
7.250	367.44	455.81	88.37	306.05	483.72	177.67	1117.65	2441.18	1870.59	3558.83
7.458	363.72	419.53	55.81	297.67	520.93	223.26	1470.59	2764.71	2882.35	4352.94

CONCLUSIONES

- Con base en los análisis realizados, se pudo comprender que el desplazamiento que se genera dentro de la subducción, en las placas tectónicas de Nazca y suramericana se dirige hacia el Este, y el movimiento, producto de los fluidos viscosos que se encuentran en el manto, van generando roca sedimentaria y varios tipos de lava, lo cual produce la deformación, que en el modelamiento se trata de demostrar a medida que converge la placa Nazca dentro de la suramericana, se generan curvas convexas de roca que van surgiendo hacia la superficie, lo que hace que esta sufra cambios drásticos en su topografía.
- Las dinámicas exógenas y endógenas de la Tierra cada vez se hacen más notorias, en ello radica la importancia de implementar estudios e investigaciones por parte de las profesiones facultadas en el ámbito de las ingenierías relacionadas a los procesos geocientíficos y las geociencias en general.
- El afloramiento de las rocas sedimentarias y sedimentos como tal en los extremos de cada una de las cordilleras indican un prisma de acreción, normalmente en este prisma son abundantes las arcillas las cuales se acumulan en el fondo del océano y con el pasar de los años son transportadas a la zona de subducción por la colisión de las placas tectónicas.
- La deformación de la subducción es la principal causa de la formación del relieve de un territorio, para el caso colombiano no es la excepción. Cabe mencionar que este relieve es oceánico y continental, producto de colisionamiento de una placa oceánica y otra continental como se pudo evidenciar en el modelamiento de las placas de Nazca y suramericana.
- Dentro de la investigación realizada, se puede concluir, que la subducción que ocurre dentro de la placa Nazca y suramericana ayuda a la formación de las cordilleras, ya que a medida que pasan los Ma. (Millones de años), el material rocoso se sigue corriendo hacia el Este y las montañas que componen las cordilleras, en el futuro

seguirán aumentando su tamaño por la constante producción de lavas y rocas sedimentarias.

- El modelamiento describe mediante fórmulas de cálculo, la deformación que ocurre dentro del movimiento tectónico, el cual se aplica a una programación y esta le da valores, así se generan las imágenes en 2D. Dentro de las variables importantes que produce el modelamiento en 2D se encuentran; el desplazamiento, la elevación
- El modelamiento en 3D, es la superposición de las imágenes en 2D, lo cual da una forma detallada de la deformación de la subducción que va ocurriendo al pasar los Ma. (Millones de Años), y se tienen en cuenta las variables: distancia, elevación y tiempo.
- Dentro de los cálculos de los puntos más altos del modelamiento, se encuentra que el punto más alto que se produce está alrededor de los 2735.29 m; esta altura se genera a los 2.002 Ma.
- Otro de los análisis importantes, es del punto más bajo de todo el modelamiento, el cual se encuentra aproximadamente a 6176 m y se produjo a los 1.504 Ma.
- El modelamiento, tuvo en cuenta las ecuaciones de deformación manejadas en el texto base, así como las derivadas de desplazamiento que se producen en los tensores, ecuaciones de gradientes espaciales, la ecuación de momentum; se describe también, la segunda ley de Newton para realizar el cálculo del volumen Lagrangiano, la ley de viscosidad de Newton y la ecuación de Navier-Stokes para la descripción del movimiento en fluidos altamente viscosos.
- Dentro del modelamiento, se pueden analizar las distancias más largas entre los puntos más altos del modelamiento, la cual se encuentra alrededor de 472.56km y esta ocurre a los 0.505 Ma. (Millones de Años)
- La distancia más larga entre los puntos a nivel medio del mar que ocurren dentro del modelamiento, está alrededor de los 493.02km y esta ocurre a los 5.752 Ma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.Taboada, C. D. (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. Bogotá D.C. .
- [2] Burga, J. D. (2017). Diccionario Geológico.
- [3] E.J.Gonzalez. (2017). Amenazas y Riesgos climáticos. Investigaciones en educación.
- [4] Francesca Meneghini, J. Casey Moore. (2007). Deformation and hydrofracture in a subduction thrust at seismogenic. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, Italia. Earth and Planetary Sciences Department, University of California,USA.: Geological Society of America Bulletin.
- [5] INGEOMINAS. (2005). Caracterización de Fuentes Sísmicas de Subducción. Bogotá: Estudio de microzonificación sísmica Santiago de Cali.
- [6] Monsalve, H. (1998). Geometría de la subducción de la placa de Nazca en el Noroeste de Colombia:Implicaciones tectónicas y sísmicas.Universidad Nacional Autónoma de México.
- [7]Monsalve-Mora. (2005). Esquema geodinámico regional para el noroccidente de suramérica.
- [8] Obi Egbue, James Kellogg, Hector Aguirre, Carolina Torres. (2013). Evolution of the stress and strain fields in the Eastern Cordillera, Colombia. Department of Earth and Ocean Sciences, University of South Carolina, Columbia, SC, USA.Equion Energy, Bogota, Colombia.BP, Houston, Texas, USA: Journal of Structural Geology.
- [9] Onno Oncken, David Hindle, Jonas Kley,Kirsten Elger,Pia Victor,Kerstin Schemmann. (2006). Deformation of the Central Andean Upper Plate System –Facts, Fiction, and Constraints for Plateau Models. The Andes. Active Subduction Orogeny: Fronteries in Earth Sciences.
- [10] Patricia Pedraza Garcia, Carlos Alberto Vargas, Hugo Monsalve J. (2007). Geometric Model of the Nazca plate subduction. Bogotá, Colombia: Earth Sciences Research Journal.

- [11] Perez, E. S.-J. (2014). Caracterización Sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas . Revista UIS.
- [12] Romero, F. R. (s.f.). Modelamiento del movimiento de las placas tectónicas. Universidad Nacional. [14] Vergara, R. (s.f.). Física General.
- [13] Allmendinger RW, Jordan TE, Kay SM, Isacks BL (1997) The evolution of the Altiplano-Puna Plateau of the Central Andes. *Ann Rev Earth Planet Sci* 25:139–17.
- [14] Kley J, Monaldi CR (2002) Tectonic inversion in the Santa Barbara system of the central Andean foreland thrust belt, northwestern Argentina. *Tectonics* 21(6): doi10.1029/2002TC902003
- [15] Jordan TE, Allmendinger RW (1986) The Sierras Pampeanas of Argentina: a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation. *Amer J Sci* 286:737–764
- [16] Jordan TE, Alonso RN (1987) Cenozoic stratigraphy and basin tectonics of the Andes Mountains, 20°–28° South latitude. *AAPG Bull* 71:49–64.
- [17] Echavarría L, Hernández R, Allmendinger R, Reynolds J (2003) Subandean thrust and fold belt of northwestern Argentina: geometry and timing of the Andean evolution. *AAPG Bull* 87(6):965–985
- [18] Cortés M, Angelier. Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanism of earthquakes. *Tectonophysics*.
- [19] Pérez Lina María (2016). Modelo numérico de la subducción de la placa de Nazca al noroccidente de Suramérica. Universidad Nacional de Colombia.
- [20] Burga, J. D. (2017). Diccionario Geológico.
- [21] Dib, C. (s.f.). Masa, Energía y Momentum.
- [22] E.J.Gonzalez. (2017). Amenazas y Riesgos climáticos. Investigaciones en educación.
- [23] INGEOMINAS. (2005). Caracterización de Fuentes Sísmicas de Subducción. Bogotá: Estudio de microzonificación sísmica Santiago de Cali.
- [24] Monsalve-Mora. (2005). Esquema geodinámico regional para el noroccidente de suramérica.

[25] Pérez, E. S.-J. (2014). Caracterización Sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas . Revista UIS.

[26] Romero, F. R. (s.f.). Modelamiento del movimiento de las placas tectónicas. Universidad Nacional.

[27] Vergara, R. (s.f.). Física General

[28] Gerya Taras (2019) Numerical Geodynamic Modelling. Second Edition. Swiss Federal Institute of Technology (ETH). Zurich.