



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
POSTGRADO DE MATEMÁTICA APLICADA A LA INGENIERÍA

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA

**Trabajo presentado en la Universidad de Los Andes como requisito para optar
al grado de Magíster Scientiae en Matemática Aplicada a la Ingeniería**

Ing. Geólogo José Gregorio Gutiérrez Chacón

C.I. 17.523.298

Tutor: Ing. María Elisa Elberg, M.Sc.

SERBIULA
Tulio Febres Cordero

DONACION

Mérida, Noviembre de 2012

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



AGRADECIMIENTOS.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora María Elisa Elberg, por su apoyo incondicional, por los conocimientos impartidos en el mundo de la simulación geomecánica, por su guía, asesoramiento y dedicación en la culminación con éxito de esta etapa de mi formación profesional.

Al profesor Leonardo González, por su asesoramiento en el área de Tectónica y Geología Estructural.

Al Centro Nacional de Cálculo Científico de la Universidad de Los Andes (CeCalCULA) por permitirme llevar a cabo la simulación de los modelos de la investigación.

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes de la Universidad de Los Andes (CDCHT) por contribuir con parte del financiamiento de esta investigación, como parte del proyecto con código I-1278-11-02-EM.

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



INDICE.

INDICE

INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. GENERALIDADES	3
I.1 Objetivos.....	3
I.1.1 Objetivo General	3
I.1.2 Objetivos Específicos.....	3
I.2 Justificación	4
I.3 Limitaciones.....	4
CAPITULO II. MARCO REFERENCIAL	6
II.1 Antecedentes.....	6
II.2 Marco Teórico	10
II.2.1 Geodinámica	10
II.2.1.1 Litósfera	10
II.2.1.2 Tectónica de Placas	12
II.2.1.2.1 Límites de Placas.....	12
II.2.1.2.1.1 Límites Divergentes.....	14
II.2.1.2.1.2 Límites Convergentes	16

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

II.2.1.2.1.3 Límite de Falla Transformante.....	20
II.2.1.3 Himalaya	21
II.2.1.3.1 Unidades Constitutivas del Himalaya.....	21
II.2.1.3.2 Placa Hindú.....	26
II.2.1.3.3 Placa Árabe.....	26
II.2.1.3.4 Placa Euroasiática.....	27
II.2.1.3.5 Orogénesis	27
II.2.1.3.5.1 Orogénesis térmica.....	28
II.2.1.3.5.2 Orogénesis mecánica	28
II.2.1.3.5.3 Orogénesis en la historia de la Tierra	29
II.2.1.4 Mecánica de Sólidos.....	30
II.2.1.4.1 Esfuerzo	30
II.2.1.4.2 Deformación	30
II.2.1.4.3 Relación Esfuerzo-Deformación	31
II.2.2 Elementos Finitos.....	35
II.2.2.1 Método de Elementos Finitos.....	35
II.2.2.2 Pasos Generales del Método de Elementos Finitos.....	35
II.2.2.2.1 Discretización y Selección del Tipo de Elemento	35
II.2.2.2.2 Generación del Mallado.....	37
II.2.2.2.3 Selección de la Función Desplazamiento	38
II.2.2.2.4 Definición de la Relación Deformación/Desplazamiento	38
II.2.2.2.5 Definición de la Relación Esfuerzo/Deformación.....	39



INDICE.

II.2.2.2.6 Ecuaciones de Rigidez para un Elemento.....	40
II.2.2.2.7 Rigidez Global.....	42
II.2.2.2.8 Cálculo de las Fuerzas Nodales.....	43
II.2.2.2.9 Interpretación de Resultados.....	43
II.2.2.2.10 Calibración del mallado y convergencia del modelo.....	43
II.3 Ubicación del Área de Estudio.....	45
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	48
III.1 Estudios Preliminares.....	48
III.2 Análisis Numérico.....	49
III.2.1 Generalidades de los Modelos 3D.....	49
III.2.1.1 Límite entre las placas Hindú-Euroasiática.....	50
III.2.1.2 Límite entre las placas Árabe-Euroasiática.....	50
III.2.1.3 Límite entre las placas Árabe-Hindú.....	50
III.2.2 Aplicación del Método de Elementos Finitos.....	51
III.2.2.1 Pre-Procesamiento.....	51
III.2.2.1.1 Creación de la Geometría.....	52
III.2.2.1.2 Propiedades de los Materiales.....	53
III.2.2.1.3 Ensamblaje.....	54
III.2.2.1.4 Tipo de Análisis.....	54
III.2.2.1.5 Interacción.....	55
III.2.2.1.6 Cargas Aplicadas y Condiciones de Borde.....	56
III.2.2.1.7 Mallado.....	58

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



INDICE.

III.2.2.2 Procesamiento	59
III.2.2.3 Post-Procesamiento.....	60
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	61
IV.1 Modelo Placas Euroasiática-Hindú	61
IV.1.1 Mallado Deformado.....	61
IV.1.2 Distribución de Esfuerzos.....	63
IV.1.3 Distribución de Deformaciones	67
IV.1.4 Distribución de Desplazamientos	70
IV.1.5 Calibración del Mallado y Convergencia del Modelo.....	72
IV.2 Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe	74
IV.2.1 Mallado Deformado.....	74
IV.2.2 Distribución de Esfuerzos.....	75
IV.2.3 Distribución de Deformaciones	80
IV.2.4 Distribución de Desplazamientos	83
IV.2.5 Calibración del Mallado y Convergencia del Modelo.....	85
IV.3 Análisis Comparativo	86
IV.3.1 Visión General	87
IV.3.2 Visión específica de la colisión entre las placas Euroasiática-Árabe ...	90
IV.3.3 Visión específica de la colisión entre las placas Euroasiática-Hindú...	92
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
V.1. Conclusiones	94
V.2 Recomendaciones.....	96

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



INDICE.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÉNDICES.....	101
Publicaciones.....	101

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, I.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I. GENERALIDADES	3
Figura I.1 Ubicación del Himalaya y su extensión desde Kashmir hasta Arunachal, así como los terrenos de Asia y la India.....	5
CAPITULO II. MARCO REFERENCIAL	6
Figura II.1 Capas composicionales y mecánica de la Tierra.....	11
Figura II.2 Ubicación de los tipos de márgenes en la zona de estudio	13
Figura II.3 Formación de Límites Divergentes. A: Abombamiento de la corteza por ascenso del magma. B: Creación del Rift. C: Mar somero por la expansión. D: Cuenca oceánica en expansión.....	15
Figura II.4 Convergencia Corteza Oceánica – Corteza Continental.....	17
Figura II.5 Convergencia Corteza Oceánica - Corteza Oceánica.....	18
Figura II.6 Convergencia Corteza Continental – Corteza Continental	19
Figura II.7 Borde de falla transformante (pasivo).....	20
Figura II.8 Esquema geológico del Himalaya.....	23
Figura II.9 Cortes geológicos del Himalaya.....	24
Figura II.10 Estructura del Siwaliks al Nepal	25
Figura II.11 Modelos de Comportamiento Esfuerzo-Deformación	32

Figura III.5 Condiciones de Borde y Cargas Aplicadas de: A) Modelo Placas Euroasiática-Hindú_B) Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.....	57
Figura III.6. Mallado de: A) Modelo Placas Euroasiática-Hindú, B) Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.....	59
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	61
Figura IV.1 Mallado Inicial. Placas Euroasiática-Hindú	62
Figura IV.2 Mallado Deformado. Placas Euroasiática-Hindú	62
Figura IV.3. Distribución de Esfuerzos Máximos. Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	63
Figura IV.4. Distribución de Esfuerzos S_{11} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	64
Figura IV.5. Distribución de Esfuerzos S_{22} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	65
Figura IV.6. Distribución de Esfuerzos S_{33} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	65
Figura IV.7. Vectores de Esfuerzos Máximos, Medios y Mínimos. Modelo Placas Euroasiática-Hindú.....	66
Figura IV.8. Distribución de Deformaciones Máximas. Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	67
Figura IV.9. Comportamiento Esfuerzo-Deformación en Rocas.....	68
Figura IV.10. Distribución de Deformaciones E_{11} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	69

Figura IV.11. Distribución de Deformaciones E_{22} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	69
Figura IV.12. Distribución de Deformaciones E_{33} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	70
Figura IV.13. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior.....	71
Figura IV.14. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Inferior.	71
Figura IV.15. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú.....	72
Figura IV.16. Convergencia del Modelo. Placas Euroasiática-Hindú	73
Figura IV.17 Mallado Inicial. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe	74
Figura IV.18 Mallado Deformado. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe	75
Figura IV.19. Distribución de Esfuerzos Máximos. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.....	76
Figura IV.20. Relocalización de eventos sísmicos locales en una sección perpendicular al Himalaya	76
Figura IV.21. Distribución de Esfuerzos S_{11} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.....	77
Figura IV.22. Distribución de Esfuerzos S_{22} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.....	78

Figura IV.23. Distribución de Esfuerzos S_{33} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.....	78
Figura IV.24. Vectores de Esfuerzos Máximos, Medios y Mínimos. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.....	79
Figura IV.25. Distribución de Deformaciones Máximas. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.	80
Figura IV.26. Distribución de Deformaciones E_{11} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.....	81
Figura IV.27. Distribución de Deformaciones E_{22} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.....	82
Figura IV.28. Distribución de Deformaciones E_{33} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.....	82
Figura IV.29. Distribución de Desplazamientos en U_3 . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.	83
Figura IV.30. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.....	84
Figura IV.31. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.....	84
Figura IV.32. Convergencia del Modelo. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe	86
Figura IV.33. Límites entre Placas Tectónicas	87

Figura IV.34. A: Distribución de Desplazamientos en U_3 , Modelo Placa Euroasiática-Hindú-Árabe. B: Imagen Satelital de Batimetría y Altimetría de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe (Tomado de: <http://www.ngdc.noaa.gov>) 89

Figura IV.35. Comparación de altitudes obtenidas en el Modelo Placa Euroasiática-Hindú-Árabe (A) con altitudes conocidas en la Imagen Satelital de Batimetría y Altimetría de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe (B) (Tomado de: <http://www.ngdc.noaa.gov>) 91

Figura IV.36. Comparación de altitudes obtenidas en el Modelo Placa Euroasiática-Hindú-Árabe (A) con altitudes conocidas en la Imagen Satelital de Batimetría y Altimetría de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe (B) (Tomado de: <http://www.ngdc.noaa.gov>) 93

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

INDICE DE TABLAS

CAPITULO III. METODOLOGÍA	48
Tabla III.1. Propiedades de la Litosfera	54
Tabla III.2. Valores de Cargas de Empuje	58
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
Tabla IV.1 Valores de Esfuerzos (N/km^2) en el área de contacto entre las placas .	66
Euroasiática-Hindú.....	66
Tabla IV.2 Valores de Deformaciones Máximas del contacto entre las placas Euroasiática Hindú	67
Tabla IV.3 Calibración del Mallado. Modelo Placas Euroasiática-Hindú.....	73
Tabla IV.4 Valores de Esfuerzos (N/Km^2) del contacto entre las placas Euroasiática-Hindú-Árabe.....	77
Tabla IV.5 Valores de Deformaciones Máximas del contacto entre las placas Euroasiática-Hindú-Árabe.....	81
Tabla IV.6 Calibración del Mallado. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe...	85
Tabla IV.7 Valores comparativos de desplazamientos en U_3 en la zona de contacto de las placas Euroasiática-Árabe.....	90



ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA

Ing. José Gregorio Gutiérrez Chacón

Tutor: Ing. María Elisa Elberg, M.Sc.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo principal analizar numéricamente la orogénesis del Himalaya, aplicando el Método de Elementos Finitos a través del paquete computacional ABAQUS™. La metodología utilizada se basa inicialmente en la indagación de tópicos conexos a la investigación, seguido por la etapa de análisis numérico que incluye los datos de entrada del modelo considerando: geometría, propiedades de los materiales, condiciones de borde, cargas actuantes y mallado. La geometría de las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe se obtiene a través de imágenes satelitales, cuyas cargas actuantes y condiciones de borde se establecen en función de las características geológicas del borde convergente existente entre las placas Euroasiática-Hindú y Euroasiática-Árabe. Para la distribución de desplazamientos U_3 , se observa que el valor máximo alcanzado fue de 5660 metros, siendo éste cercano a 6000 metros, que corresponden a los valores promedios de la altura de la cadena montañosa del Himalaya. Por otra parte, los esfuerzos máximos compresivos se producen en la dirección S_{22} , los medios principales en la dirección S_{11} y los mínimos principales en la dirección S_{33} . Esta distribución y cuantificación de desplazamientos en U_3 , esfuerzos y deformaciones, junto con el análisis comparativo, permiten emular el origen de la cadena montañosa más imponente de nuestro planeta, el Himalaya.

Palabras Claves: *Calibración, Convergencia, Método de Elementos Finitos, Simulación, Himalaya.*

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

INTRODUCCIÓN

Para el año de 1968, se unieron varios conceptos sobre nuestro planeta y su composición con bases en el movimiento de las placas tectónicas como el de la deriva continental y expansión del fondo oceánico, dando origen a una teoría mucho más completa conocida como la tectónica de placas, la cual está compuesta por una variedad de ideas que explican el movimiento observado de la litósfera terrestre por medio de los mecanismos de subducción y expansión del fondo oceánico, que, a su vez, generan los principales rasgos geológicos de la Tierra, entre ellos los continentes y las cuencas oceánicas. Según el modelo de esta teoría, el manto superior, junto con la corteza, se comportan como una capa fuerte y rígida, conocida como la litósfera. Esta capa externa se encuentra por encima de una región más débil del manto, conocida como astenósfera. Además la litósfera está rota en numerosos fragmentos, denominados placas que están en movimiento y cambian continuamente de tamaño y forma (Tarbuck y Lutgens, 1999).

Las placas se mueven como unidades coherentes en relación con las otras placas. Aunque el interior de las placas puede deformarse, las principales interacciones entre las placas individuales se producen a lo largo de sus bordes. Estos bordes, pueden ser: convergentes, divergentes y de falla transformantes. Cada placa está rodeada por una combinación de estas zonas, como es el caso de las placas Euroasiática, Hindú y Árabe. Por esta razón, se aplica el Método de Elementos Finitos (MEF) para estudiar la interacción entre el margen convergente de las placas Hindú y Árabe con la placa Euroasiática, a través de modelos tridimensionales, y de esta manera, obtener una explicación físico-numérica de los fenómenos geológicos que se observan continuamente en estas zonas. Para ello, el análisis inicia considerando un primer modelo entre el contacto de las placas Euroasiática-Hindú, lo cual permite obtener una visión general del sistema orogénico con las mayores elevaciones del planeta,

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



INTRODUCCIÓN.

esto es, la cordillera del Himalaya. Seguidamente, se realiza un segundo modelo que integre las placas Euroasiática-Hindú-Árabe, el cual permite que las condiciones de borde se ajusten mejor al entorno geológico en análisis. En este sentido, se pretende determinar los valores de desplazamientos verticales o alturas de la cadena montañosa del Himalaya para lo cual la investigación se estructura de la siguiente manera:

Capítulo I. Presenta las generalidades del trabajo, compuesto por objetivos, justificación y limitaciones.

Capítulo II. Comprende los antecedentes, marco referencial, resaltándose principalmente la teoría de tectónica de placas, concepto de esfuerzo deformación, método de elementos finitos y sus bases conceptuales y, ubicación del área en estudio.

Capítulo III. Describe la metodología desarrollada, la cual incluye estudios preliminares, y los pasos desarrollados durante la aplicación del programa computacional ABAQUSTM en la realización del análisis numérico.

Capítulo IV. Muestra los resultados obtenidos aplicando la sistemática desarrollada en el capítulo precedente. Se ilustran la distribución de alturas, esfuerzos y deformaciones obtenidas en los modelos considerados durante la simulación con ABAQUSTM.

Capítulo V. Compuesto por las conclusiones y recomendaciones, siendo éstas la última parte de la investigación.

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CAPITULO I. GENERALIDADES

Este capítulo comprende los aspectos iniciales de la investigación, los cuales establecen la dirección que debe tomar la investigación; entre estos se tiene el objetivo general y objetivos específicos los cuales describen de manera precisa a que se aspira llegar con el desarrollo del trabajo, la justificación para la selección de este tópico, así como también, las limitaciones presentadas durante su proceso de ejecución.

I.1 Objetivos

I.1.1 Objetivo General

Analizar el sistema de margen convergente durante el proceso de formación de la cadena montañosa del Himalaya mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos.

I.1.2 Objetivos Específicos

- Recopilar la información bibliográfica y estudios preliminares relacionados con el tema de investigación.
- Acoplar las condiciones geológicas del medio a los modelos numéricos con sus respectivas geometrías y condiciones de borde que garanticen la realidad geológica del área en análisis.
- Realizar modelos numéricos 3D de los contactos entre las placas Euroasiática-Hindú-Árabe.
- Analizar la convergencia de las variables geonuméricas.

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

I.2 Justificación

Los métodos numéricos constituyen actualmente una herramienta poderosa en la solución de problemas de ingeniería, ya que permiten realizar entre sus tantos usos, el estado de esfuerzo-deformación, a través del Método de Elementos Finitos (MEF).

La aplicación del MEF en el área de geología e ingeniería geológica, actualmente se encuentra en un constante crecimiento obteniéndose resultados aproximados con las condiciones del medio de observación y análisis. En este sentido, este trabajo realiza una caracterización tectónica del contacto entre las placas Euroasiática, Hindú y Árabe, a través de simulaciones numéricas empleando el MEF, permitiendo observar y analizar la evolución geológica del levantamiento de la cadena montañosa del Himalaya.

La importancia en cuanto a la escogencia del área de investigación radica en que la misma representa las mayores altitudes de nuestro planeta, es decir, 8848 metros sobre el nivel del mar, así como también, que dicha sierra tiene una longitud de 2400 kilómetros desde Kashmir al oeste hasta Arunachal al este, ver figura I.1, siendo de gran interés geológico observar y analizar el comportamiento de los márgenes convergentes de las placas en estudio que dieron origen a estas altitudes, valores numéricos de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos.

I.3 Limitaciones

El planeta Tierra es un sistema dinámico en el que ocurren cambios internos y externos de manera continua, dichos cambios son productos de diferentes procesos que traen consigo un efecto dentro y fuera de la superficie terrestre. Entre estos efectos se encuentra el movimiento de las placas tectónicas que conforman nuestro

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

planeta. En este sentido, el estudio de estos movimientos debe realizarse considerando todas las placas tectónicas que forman parte del planeta Tierra. Sin embargo, en ésta investigación por ser una primera aproximación a modelos numéricos de este tipo, sólo se consideran las placas Euroasiática, Hindú y Árabe, ya que en el borde convergente de las mismas se produce la cadena montañosa del Himalaya, la cual contiene las más altas elevaciones de nuestro planeta y es de los esquemas estructurales geológicos más complejos e importantes en estudio a nivel mundial.

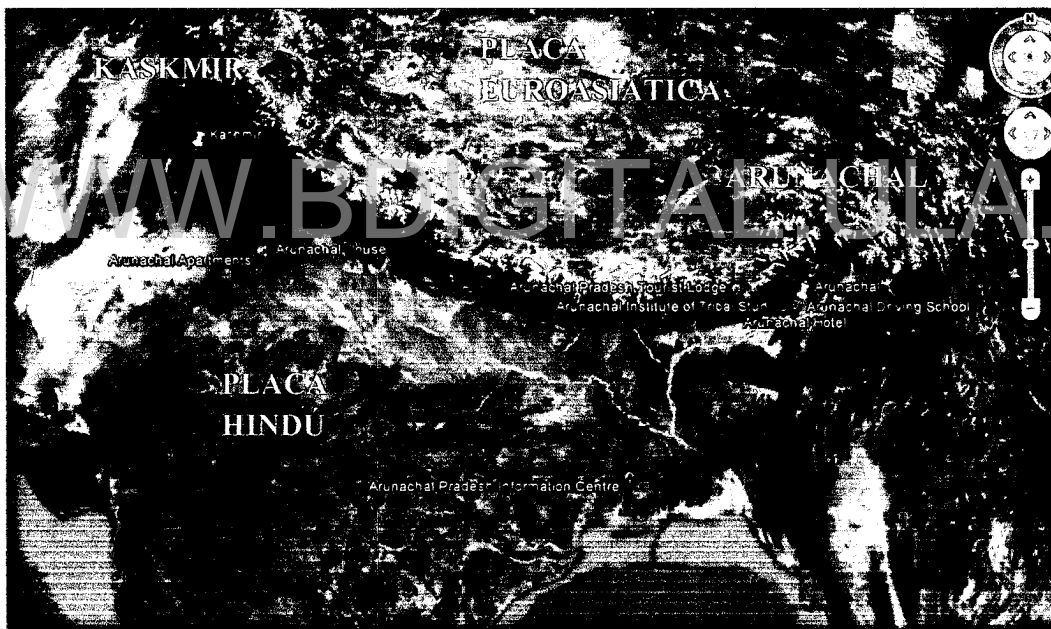


Figura I.1 Ubicación del Himalaya y su extensión desde Kashmir hasta Arunachal, así como los terrenos de Asia y la India
(Tomado y modificado de Google Earth, 1999).

CAPITULO II. MARCO REFERENCIAL

Esta sección inicia con los antecedentes de la investigación, los cuales se enfocan en temas relacionados con la investigación, es decir, en la aplicación del método de elementos finitos en geomecánica y geología. Posteriormente, se exponen las bases conceptuales requeridas durante el desarrollo del trabajo partiendo de conceptos básicos de litósfera, tectónica de placas, seguido por el Método de Elementos Finitos, y finalmente, se muestra la ubicación del área en estudio.

II.1 Antecedentes

- **Cabello, D.; Navarrete M. y Elberg, M. (2005).** Usando el Método de Elementos Finitos realizaron la simulación de la Falla La Hechicera, logrando la elaboración de un modelo ideal elástico para las simulaciones geomecánicas de este tipo, es una representación que se asemeja a la realidad y, las aproximaciones de los modelos generados, permiten establecer analogías para las estructuras conformadas en niveles estructurales superiores, como es el caso de la estructura estudiada por ellos. Igualmente establecen que los modelos en tres dimensiones, permiten captar visualmente de mejor manera cómo es el movimiento de un bloque con respecto al otro, pero en general el tiempo y trabajo invertido son notablemente mayores, por lo cual es preferible solo trabajar con modelos elaborados en dos dimensiones, para este caso.
- **Dyksterhuis, S.; Albert, R.A. y Muller, R.D (2005)** emplearon el paquete computacional ABAQUSTM para analizar el estado de esfuerzo interno de la placa Australiana, obteniendo resultados aproximados a los que se observan

actualmente en la misma, cuyos valores máximos se producen en las zonas donde hay mayor heterogeneidad de los materiales que la constituyen.

- **Elberg, M.; Quintero, J.; González, L. y Bongiorno, F. (2006).** Utilizando el método numérico de elementos finitos a través del programa ABAQUS™ lograron simular el efecto del corrimiento de Mesa Bolívar sobre el Túnel de Estanques en la Autopista Rafael Caldera del Estado Mérida, con el cual determinaron que los datos de deformación, esfuerzo y desplazamiento obtenidos para la simulación de cada uno de los modelos de características elásticas, según los desplazamientos de 5 cm impuestos a la falla, no sobrepasan los límites de resistencia del túnel de Estanques, permitiendo inferir que durante la eventual activación del corrimiento de Mesa Bolívar con las condiciones antes expuestas el túnel no sufriría deformaciones que logren activar rangos plásticos.
- **García, J. (2007).** Estudió la geometría, sismicidad y deformación de la placa Cocos subducida, con la finalidad de determinar el estado de esfuerzos a los que se encuentra sometida la misma en su límite de subducción. Los modelos se basan en que la inclinación de la placa de Cocos cambia de subhorizontal a muy abrupta, así como también, que bajo la placa de Norte América el ángulo de subducción es pequeño entre 15° y 20°, mientras que bajo la placa Caribe el ángulo de Subducción cambia a abrupto entre 40° y 50°.
- **Elberg, M. y Sosa, G. (2008).** Estudiaron la energía de deformación entre las placas Suramericanas, Nazca y Caribe con la aplicación del Método de Elementos Finitos. Éste análisis muestra que existe una relación directa entre la energía de deformación antes de un evento intraplaca, la subsiguiente

generación de energía y su acumulación, distribución y posterior liberación, generando un ciclo que depende de factores como la velocidad de desplazamiento de las placas y las características del medio geomecánico.

- **Sosa, G.; Alam, A. y Elberg, M. (2008).** En el trabajo titulado Simulación Geomecánica de las Zonas de Riesgo Geológico en la Franja Costera del Estado Carabobo a partir de modelos elásticos; lograron obtener los valores de componentes de desplazamiento vertical, deformación unitaria elástica y esfuerzos de cizalla en taludes del área mediante la aplicación de métodos numéricos y el programa ABAQUS™.
- **Gutiérrez, J. y Monsalve, M. (2010).** Utilizando el Método de Elemento Finitos mediante el paquete computacional ABAQUS™, realizó un análisis de estabilidad del deslizamiento del sector “Las González”, Municipio Sucre, Estado Mérida, determinando que la distribución de los desplazamientos coincide con el comportamiento del deslizamiento en estudio, ubicándose los valores máximos sobre la cabecera del deslizamiento y los mínimos hacia la base y borde lateral de cada perfil, debido a las condiciones de borde consideradas durante la simulación.
- **Torres, J.; Gutiérrez, J. y Elberg, M. (2010).** Realizaron una simulación numérica de los límites entre las placas Euroasiática, Australiana y Filipina empleando el Método de Elementos Finitos a través de modelos elásticos tridimensionales, con el cual obtuvieron que los mayores esfuerzos se presentan en las zonas de contacto entre las placas, debido a que es la zona de mayor actividad geotectónica.

- **Gutiérrez, J.; Torres, J. y Elberg, M. (2010).** Usaron el Método de Elementos Finitos en el análisis numérico de la formación del Himalaya por el contacto de las placas Euroasiática, Hindú y Árabe, a través de modelos tridimensionales, permitiendo reconstruir de esta manera la formación de esta importante cadena montañosa y la determinación cuantitativa de esfuerzo y deformación que le dieron origen.
- **Elberg, M.; Fernández, V.; Vivas, J.; Sosa, G. y González, L. (2011).** Aplicaron el Método de Elementos Finitos para realizar un análisis numérico elástico de las discontinuidades del macizo rocoso en las cercanías del Túnel Santa Teresa en el Estado Mérida, en el cual, las deformaciones se ubican sobre la bóveda del túnel llegando a afectar los hastiales, siendo esto, indicativo de que la principal fuerza presente, resulta ser la carga litostática. Por otra parte, en algunos modelos estudiados obtuvieron que los esfuerzos presentan un comportamiento en sintonía con las deformaciones. Aplicando su mayor valor sobre las discontinuidades presentes hacia la base de dichos modelos.
- **Elberg, M. y Ogaya N. (2012).** Realizaron un análisis numérico de la interacción presa-talud del complejo hidroeléctrico José Antonio Páez, empleando el Método de Elementos Finitos a través del programa computacional ABAQUS™, con la finalidad de determinar esfuerzos, deformaciones y desplazamientos producto del empuje hidráulico sobre los taludes sobre los que se emplazó el cuerpo de la presa.
- **Gutiérrez, J. y Elberg, M. (2012).** Analizaron numéricamente la orogénesis del Himalaya, mediante la aplicación del programa computacional

ABAQUS™, realizando modelos comparativos de desplazamientos verticales con imágenes satelitales de batimetría del área en análisis. A su vez, llevaron a cabo la calibración y convergencia de los modelos numéricos empleados durante la simulación, validando valores de desplazamientos verticales obtenidos con alturas reales conocidas en la cordillera del Himalaya.

II.2 Marco Teórico

II.2.1 Geodinámica

La Tierra es un sistema dinámico en el cual ocurren cambios continuamente, los cuales se ven reflejados tanto en el interior como en el exterior de la superficie terrestre. Dicho sistema puede ser descrito de dos maneras: capas composicionales y capas mecánicas, ver figura II.1 (Tarbuck y Lutgens, 1999):

- Capas composicionales: las cuales son producto de cambios de densidades durante las primeras etapas de la historia de la Tierra. Éstas poseen propiedades químicas diferentes, haciendo que el interior de nuestro planeta no sea homogéneo. Estas capas son: corteza, manto y núcleo.
- Capas mecánicas: son divisiones estructurales en donde los materiales han experimentado un cambio de fase debido a variación de presión, temperatura y densidad de los materiales. Estas capas son: litósfera, astenósfera, mesósfera (manto inferior), núcleo externo y núcleo interno.

II.2.1.1 Litósfera

La litósfera incluye la corteza y una parte del manto superior, es la envoltura superficial del globo, se le conoce también como esfera de roca y a pesar de tener

materiales con composición química diferente, se comporta de manera similar como una unidad frente a la deformación mecánica. Tiene un grosor promedio de 100 kilómetros, puede extenderse 250 kilómetros o más por debajo de las porciones más antiguas de los continentes. Es importante destacar que la resistencia de los diversos materiales terrestres está en función de su composición, así como de la temperatura y presión de su entorno.

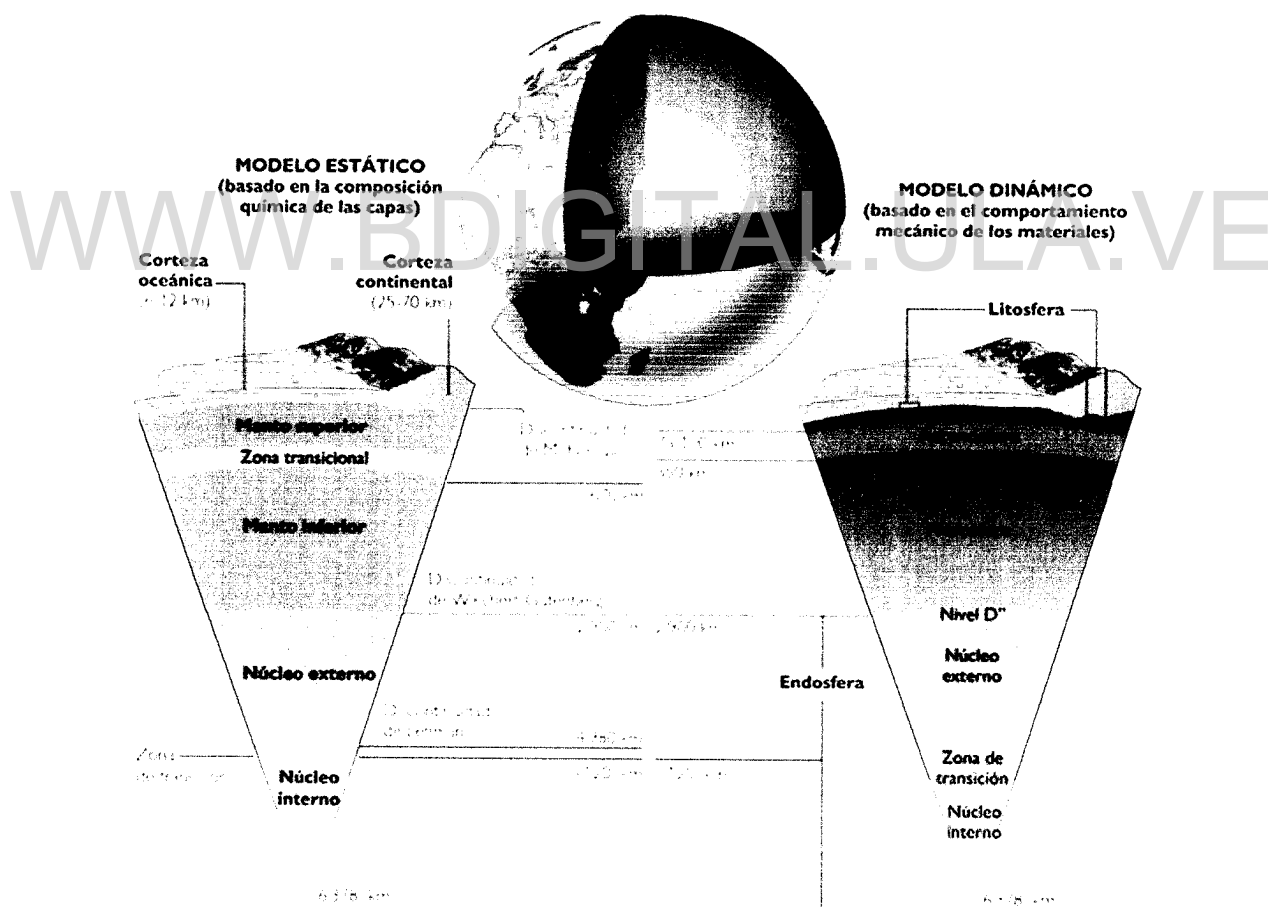


Figura II.1 Capas composicionales y mecánica de la Tierra.

(Tomado de http://laestructuradelatierrayloscambiongeolo.blogspot.com/2010_09_01_archive.html)

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (CUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La rigidez de la litósfera permite a las placas tectónicas transmitir los esfuerzos elásticos durante intervalos de tiempo geológico. Los esfuerzos que son aplicados en las fronteras de las placas pueden ser transmitidos a toda la parte interior de la misma.

II.2.1.2 Tectónica de Placas

Existieron diversas teorías que trataron de explicar el movimiento de las placas, siendo la más aceptada hoy en día, la teoría de tectónica de placas. Esta teoría considera la litósfera como una envoltura continua, fragmentada en un cierto número de casquetes esféricos rígidos llamadas placas, que están en movimiento lento y continuo, de unos pocos centímetros al año y cuya forma y tamaño, cambian continuamente.

Se reconocen siete placas principales: Norteamericana, Suramericana, del Pacífico, Africana, Euroasiática, Australiana y de la Antártida. Dentro de placas con tamaño intermedio se encuentran: la Caribeña, Nazca, Filipinas, Árabe, Cocos y Scotia.

II.2.1.2.1 Límites de Placas

Cada placa se mueve como una unidad coherente con respecto a las otras placas y que, aunque, el interior de las placas puede deformarse, todas las interacciones entre ellas se producen a lo largo de sus límites. Estos pueden ser (Tarbuck y Lutgens, 1999):

- Límites Divergentes: en el que las placas se separan produciendo la ascensión del material del manto, creándose así un nuevo suelo oceánico, por ejemplo Antártica y Africana (ver figura II.2(a)).

- Límites Convergentes: en este caso las placas se aproximan una con respecto a la otra, teniendo como consecuencia la subducción o consumo de la litósfera oceánica en el manto, por ejemplo, Euroasiática-Hindú (ver figura II.2(b)).
- Límites de falla transformante, en donde las placas se deslizan una con respecto a la otra. Sin producción ni destrucción de la litósfera.

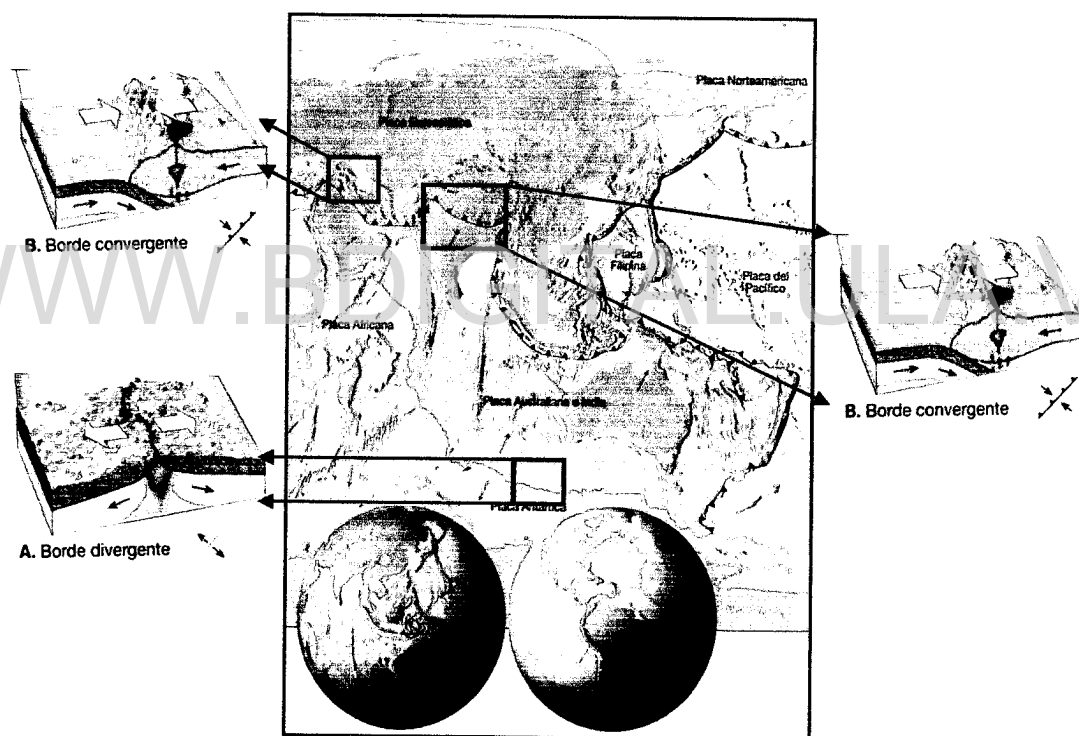


Figura II.2 Ubicación de los tipos de márgenes en la zona de estudio
(Tomado y modificado de Tarbuck y Lutgens, 1999)

II.2.1.2.1.1 Límites Divergentes

Los límites divergentes se sitúan a lo largo de las crestas de las dorsales oceánicas cuando se produce la expansión de las placas (ver figura II.3). Allí, a medida que las placas se separan del eje de la dorsal, las fracturas creadas se llenan instantáneamente con roca fundida que asciende desde la astenósfera caliente situada debajo. Este material caliente se enfría generando una roca dura, produciendo de ésta manera nuevos fragmentos de fondo oceánico. Este mecanismo es lo que se denomina expansión del fondo oceánico.

Las velocidades típicas de expansión del fondo oceánico oscilan entre 2 centímetros y 20 centímetros al año, siendo lo bastante rápido para que todas las cuencas oceánicas de la Tierra se hayan generado en los últimos 200 millones de años.

No todos los centros de expansión se encuentran en el medio de los grandes océanos. Cuando se forma un centro de expansión dentro de un continente, la masa continental puede escindirse en dos o más segmentos menores. El efecto de esta actividad es el abombamiento de la corteza directamente por encima de la pluma ascendente caliente. Esta elevación produce fuerzas de extensión que estiran y adelgazan la corteza. La extensión de la corteza va acompañada de episodios alternos de formación de fallas y de vulcanismos. Adyacentes al eje de expansión, los bloques de la corteza están limitados por fallas y forman unos valles alargados denominados rifts. En la medida que continúa la expansión, el rift se alargará e incrementará su profundidad, ensanchándose al final en un océano. Al llegar a esta fase el valle se convertirá en un mar lineal y la zona de rift seguirá siendo un lugar de actividad ígnea, generando continuamente nuevo fondo oceánico en una cuenca oceánica en continua expansión como se muestra en la figura II.3.

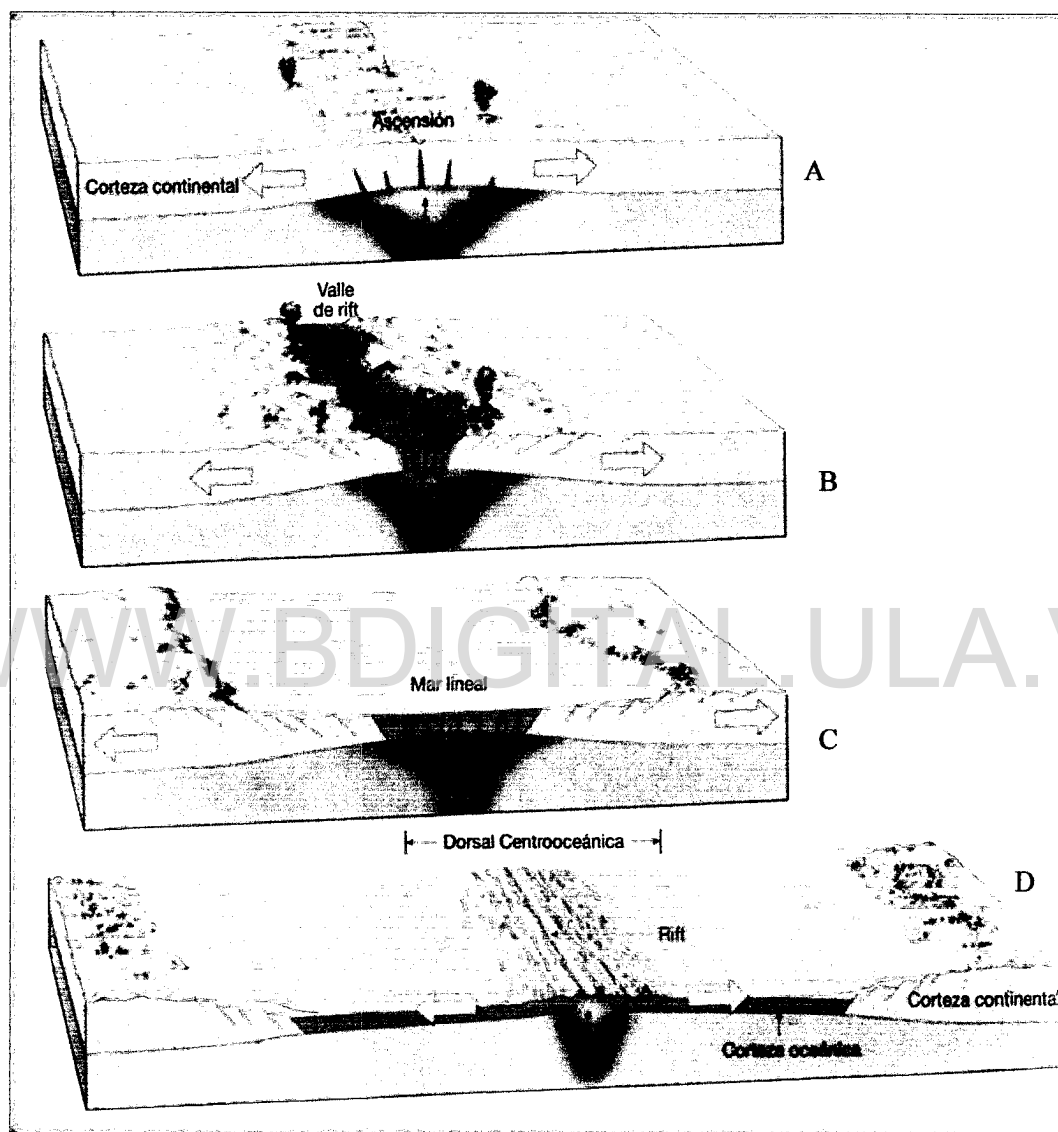


Figura II.3 Formación de Límites Divergentes. A: Abombamiento de la corteza por ascenso del magma. B: Creación del Rift. C: Mar somero por la expansión. D: Cuenca oceánica en expansión. (Tomado de Tarbuck y Lutgens, 1999)

II.2.1.2.1.2 Límites Convergentes

Los límites convergentes son lugares donde la litósfera es subducida y absorbida en el manto. Cuando dos placas convergen, el borde frontal de una se dobla hacia abajo, lo que permite que descienda. La región en la que se produce el descenso de una placa oceánica hacia la astenósfera se denomina zona de subducción. El ángulo medio con el cual la litósfera oceánica desciende en la astenósfera es de unos 45 grados, pero dependiendo de su flotabilidad, una placa puede descender a unos pocos grados o puede caer en vertical en el manto.

A pesar de que los límites convergentes tienen las mismas características básicas, tienen rasgos muy variables, controlados por el tipo de material de la corteza que interviene y por el ambiente tectónico. Éstos se pueden formar entre dos placas oceánicas, una placa oceánica y una continental, o dos placas continentales.

II.2.1.2.1.2.1 Convergencia Corteza Oceánica- Corteza Continental

En este borde, la placa que tiene el material continental con menor densidad, seguirá “flotando”, mientras que la placa de corteza oceánica con mayor densidad se hundirá a la astenósfera, ver figura III.4.

A medida que la placa desciende, parte de los sedimentos transportados por ella, así como fragmentos de la corteza oceánica, se separan y se adosan al borde de la placa formada por corteza continental, formando lo que se denomina prisma de acreción.

Cuando la placa descendiente llega a una profundidad entre 100 y 150 kilómetros, el calor impulsa el agua y otros componentes volátiles de los sedimentos subducidos hacia el manto suprayacente. Esas sustancias actúan como fundentes, induciendo la

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

fusión parcial de rocas del manto a bajas temperaturas, convirtiéndose en magmas, que al ser menos denso que las rocas del manto, ascenderá por flotación. Una parte de éste magma, puede migrar a la superficie, donde dará lugar a erupciones volcánicas.



Figura II.4 Convergencia Corteza Oceánica – Corteza Continental.
(Tomado de Tarbuck y Lutgens, 1999)

II.2.1.2.1.2.2 Convergencia Corteza Oceánica – Corteza Oceánica

Al producirse este tipo de convergencia, una de las dos placas desciende por debajo de la otra, iniciando la actividad volcánica de una manera similar a lo que ocurre en un límite convergente océano-continente, sin embargo, los volcanes se forman en el fondo oceánico. Si esta actividad llegará a mantenerse, construirá estructuras volcánicas que emergen como islas (ver figura II.5). Esta tierra recién formada que consiste en una cadena en forma de arco de pequeñas islas volcánicas se denomina arcos de islas volcánicas.

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

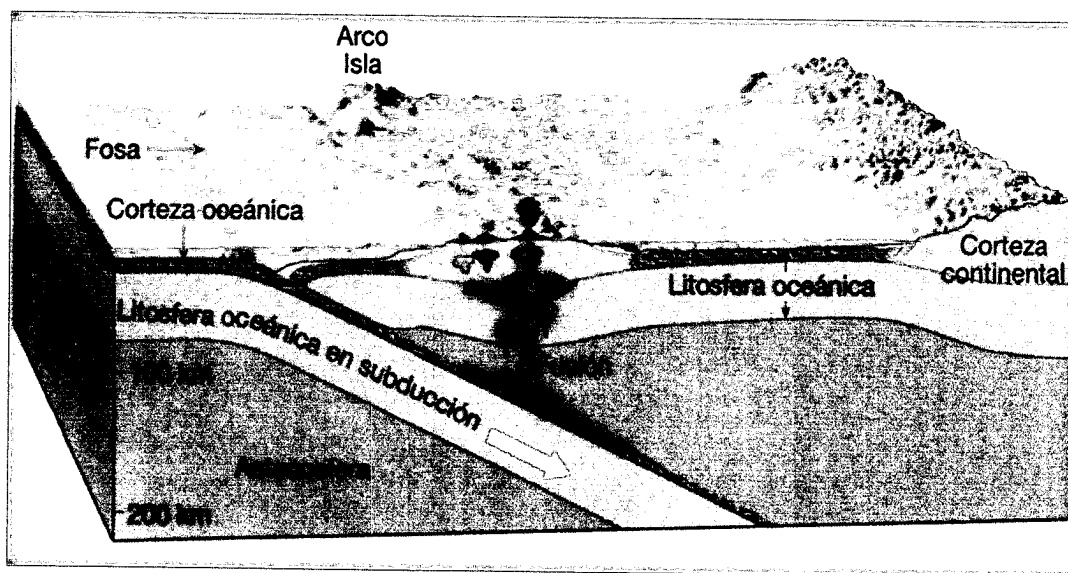


Figura II.5 Convergencia Corteza Oceánica - Corteza Oceánica.
(Tomado de Tarbuck y Lutgens, 1999)

II.2.1.2.1.2.3 Convergencia Corteza Continental – Corteza Continental

En este tipo de límite, ninguna de las placas subducirá debajo de la otra, debido a su baja densidad. El resultado es una colisión entre los dos bloques continentales. Este tipo de colisión fue la que se produjo cuando el subcontinente de India “embistió” Asia y produjo el Himalaya (ver figura II.6). Durante esta colisión, la corteza continental se abombó, se fracturó, y en general, se acortó y engrosó (Tarbuck y Lutgens, 1999). Se estima que la corteza continental en el Himalaya se ha acortado aproximadamente 300 kilómetros o más (Turcotte y Schubert, 1982).

Antes de una colisión corteza continental con corteza continental, las masas de tierra afectadas están separadas por una cuenca oceánica. A medida que los bloques de corteza continental convergen, el fondo oceánico que queda entre ellos es subducido

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

debajo de una de las placas. La subducción inicia la fusión parcial de las rocas del manto suprayacente, lo cual, a su vez, provoca la formación de un arco de islas volcánica.

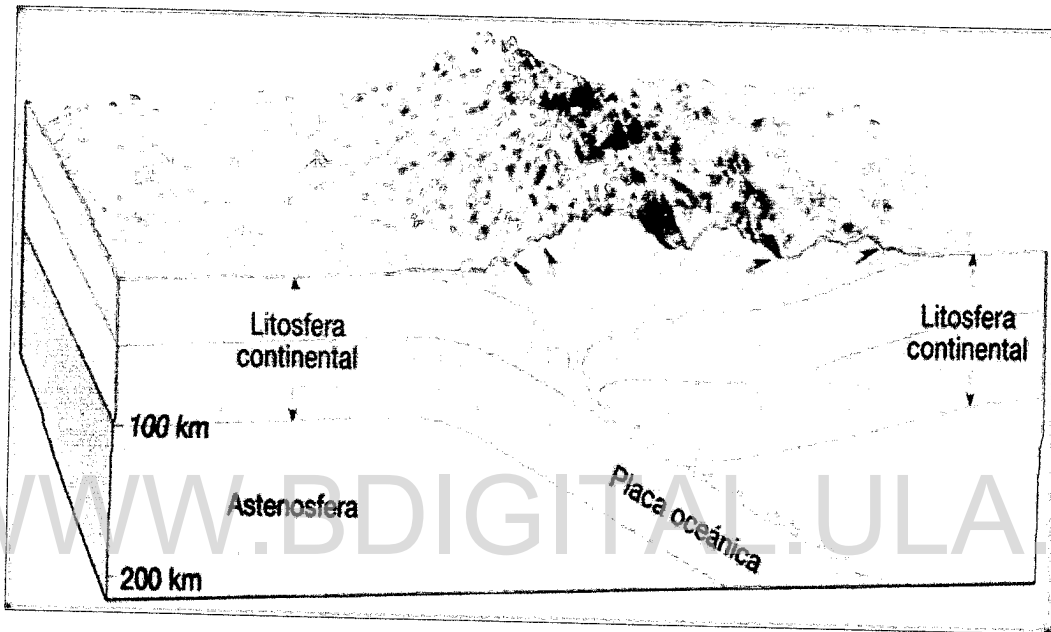


Figura II.6 Convergencia Corteza Continental – Corteza Continental
(Tomado de Tarbuck y Lutgens, 1999)

Después de que colisionan los bloques de corteza continental, la placa oceánica subducida puede separarse del bloque continental y continuar su movimiento descendente. Sin embargo, debido a su flotabilidad, la litósfera continental no puede ser transportada muy al interior del manto. En el caso del Himalaya, el borde frontal de la placa Hindú fue subducida parcialmente debajo de la placa Euroasiática, dando lugar a una litósfera continental de un grosor inusualmente grande. Esta acumulación explica, en parte, la gran elevación del Himalaya y ayuda a explicar la elevada llanura tibetana situada al norte.

II.2.1.2.1.3 Límite de Falla Transformante

Es un límite pasivo, en el cual, las placas tectónicas se desplazan una respecto a la otra, sin producir ni destruir litósfera. Este tipo de borde fue identificado allí donde desplazan los segmentos desalineados de una dorsal oceánica. Cabe destacar que todas las dorsales observadas mediante imagenología muestran este tipo de falla

La mayoría de las fallas transformantes une dos segmentos de una dorsal centrooceánica. Aquí, son parte de unas líneas prominentes de rotura en la corteza oceánica conocidas como zonas de fracturas, que abarcan las fallas transformantes y sus extensiones inactivas en el interior de las placas (ver figura II.7).

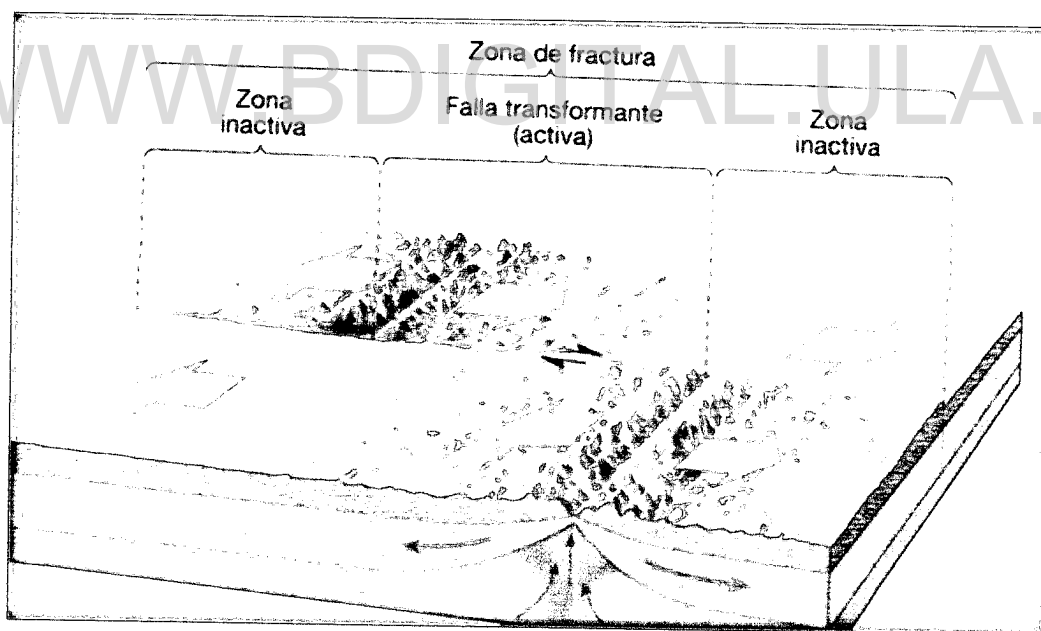


Figura II.7 Borde de falla transformante (pasivo)
(Tomado de Tarbuck y Lutgens, 1999)

II.2.1.3 Himalaya

Es una cordillera situada en el continente asiático, y se extiende por los países de Bután, China, Nepal e India. Su nombre procede del sánscrito, *jimālaia*, palabra compuesta por *jimá*: ‘nieve’ y *alaia*: ‘morada, lugar’. Es la cordillera más alta de la Tierra, con diez de las catorce cimas de más de 8000 metros de altura, incluyendo el Everest, con sus 8848 msnm, la montaña más alta del planeta.

En un sentido amplio se menciona como «sistema de los Himalayas» al sistema de montañas compuesto por las cordilleras del Himalaya, Karakórum, Hindu Kush y diversas otras subcordilleras que se extienden a partir del Indenter y sus subcordilleras adyacentes, y que forman un arco de oeste a este de 2400 kilómetros, y cuya anchura de norte a sur varía desde los 400 kilómetros en la zona más occidental, entre Cachemira y Xinjiang, hasta los 150 km al este, entre la parte oriental del Tíbet y el estado indio de Arunachal Pradesh. Este sistema montañoso se extendería por siete Estados, sumando Afganistán, Birmania y Pakistán a los ya mencionados, e incluiría a las 14 montañas de la Tierra con una altitud mayor de 8000 msnm.

En el Himalaya nacen algunos de los mayores ríos del mundo como son el Ganges, Indo, Brahmaputra, Yamuna y Yangtsé, en cuyos cauces viven no menos de 1300 millones de personas. Las montañas del Himalaya han influido profundamente en las culturas de Asia del Sur y muchas de ellas son consideradas sagradas para el Hinduismo o el Budismo (tomado de: <http://es.wikipedia.org/wiki/Himalaya>).

II.2.1.3.1 Unidades Constitutivas del Himalaya.

De Sur a Norte las unidades morfoestructurales presentes son (Debelmas *et al* 2008), ver figuras II.8-II-10:

- a) La llanura aluvial del Indo-Ganges, formada por los dos grandes ríos (Indo, Ganges) y sus afluentes, es una cuenca sedimentaria continental muy abundante, asimétrica, a los pies de la cadena, el espesor de los sedimentos es de hasta 6 km y se trata de una cuenca típica flexural.
- b) Los Siwaliks forman una serie de cabalgamientos compuesto de material detrítico del Neógeno a Cuaternario. Se trata de un conjunto de escamas cabalgando hacia el Sur al Cuaternario del Ganges en la zona “Main Frontal Thrust”, MFT.
- c) El Himalaya Medio cabalga a Los Siwaliks en la zona “Main Central Thrust”, MCT. Muestra series esencialmente Precámbricas (1800 a 540 Ma), localmente con secuencias más recientes, casi a facies continentales salvo en el Eoceno que presenta intercalaciones marinas. Estas secuencias forman un apilamiento de capas pluri-deformadas. Las capas inferiores presentan en cumbre una secuencia continental Oligo-Miocena. La deformación principal es caracterizada por esquistosidad regional al norte y cizallamientos al sur.
- d) El Himalaya Superior cabalga al Himalaya Medio en la zona “Main Central Thrust”, MCT, muy continuo a lo largo de la cadena. Presenta una meseta metamórfica (Precámbrico a Cámbrico) en facies de anfibolita (6 a 8 Kb, 650-750 °C) hasta 5 kilómetros de espesor. Algunas zonas presentan facies de anfibolita de mayor grado (eclogita y granulita), lo que indica que las rocas aflorantes han sufrido retrocesos.
- e) La zona de sutura Indus-Zangbo es de dominio ofiolítico, compuestos por apilamientos multi-deformados, algunas veces verticales, compuesto por facies flysch, pizarras, peridotitas y conglomerados continentales.
- f) La cadena trans-himalaya está constituida por formaciones magmáticas y volcánicas, de tendencia calco-alcalina, de edad Cretácico Superior a Eoceno. Esta cadena representa una antigua cadena de subducción, resultante de la subducción del Océano Tetis y que precedió la colisión.



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MÉRIDA, VENEZUELA

CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL.

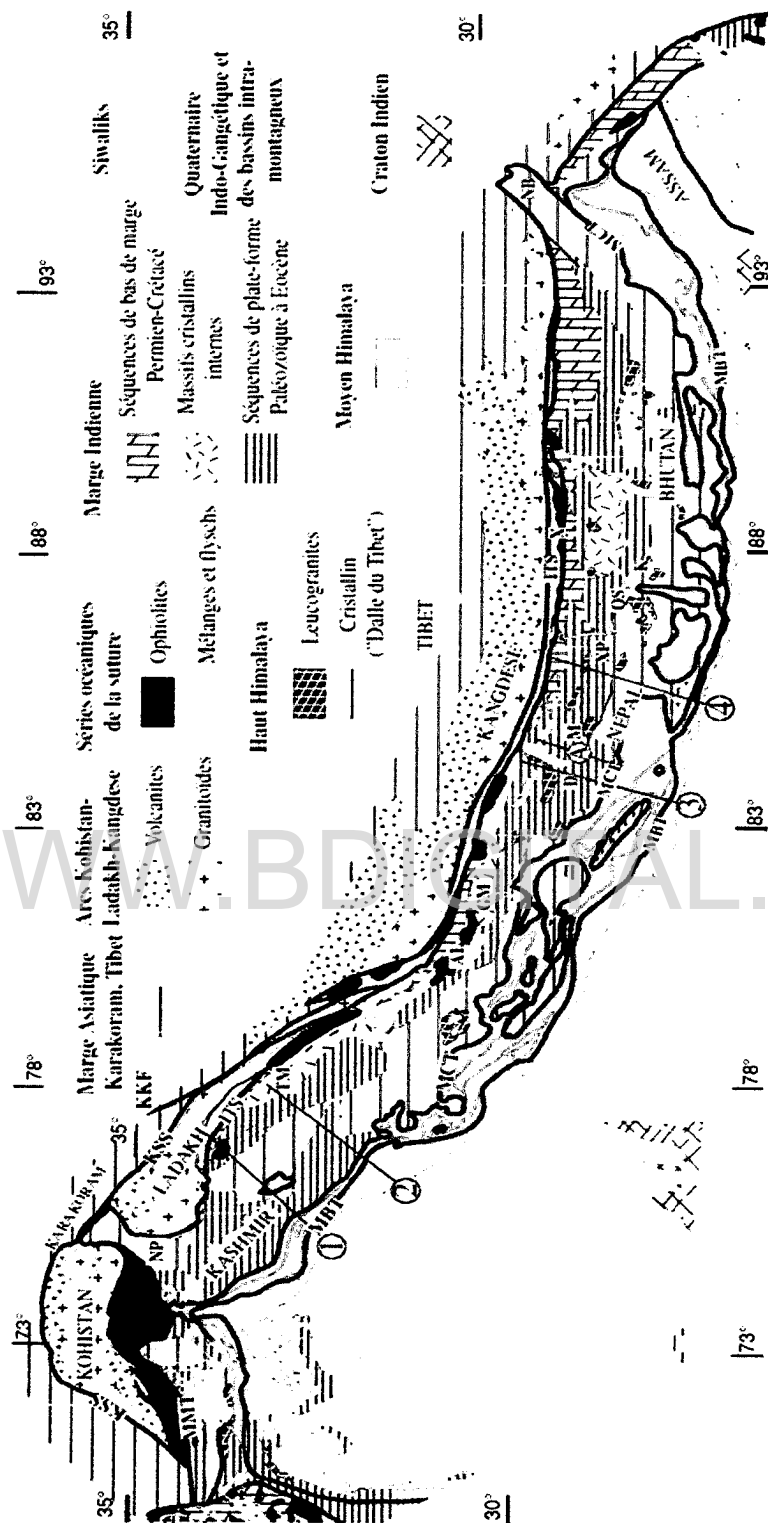


Figura II.8 Esquema geológico del Himalaya
(Tomado de Debelmas *et al* 2008)

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

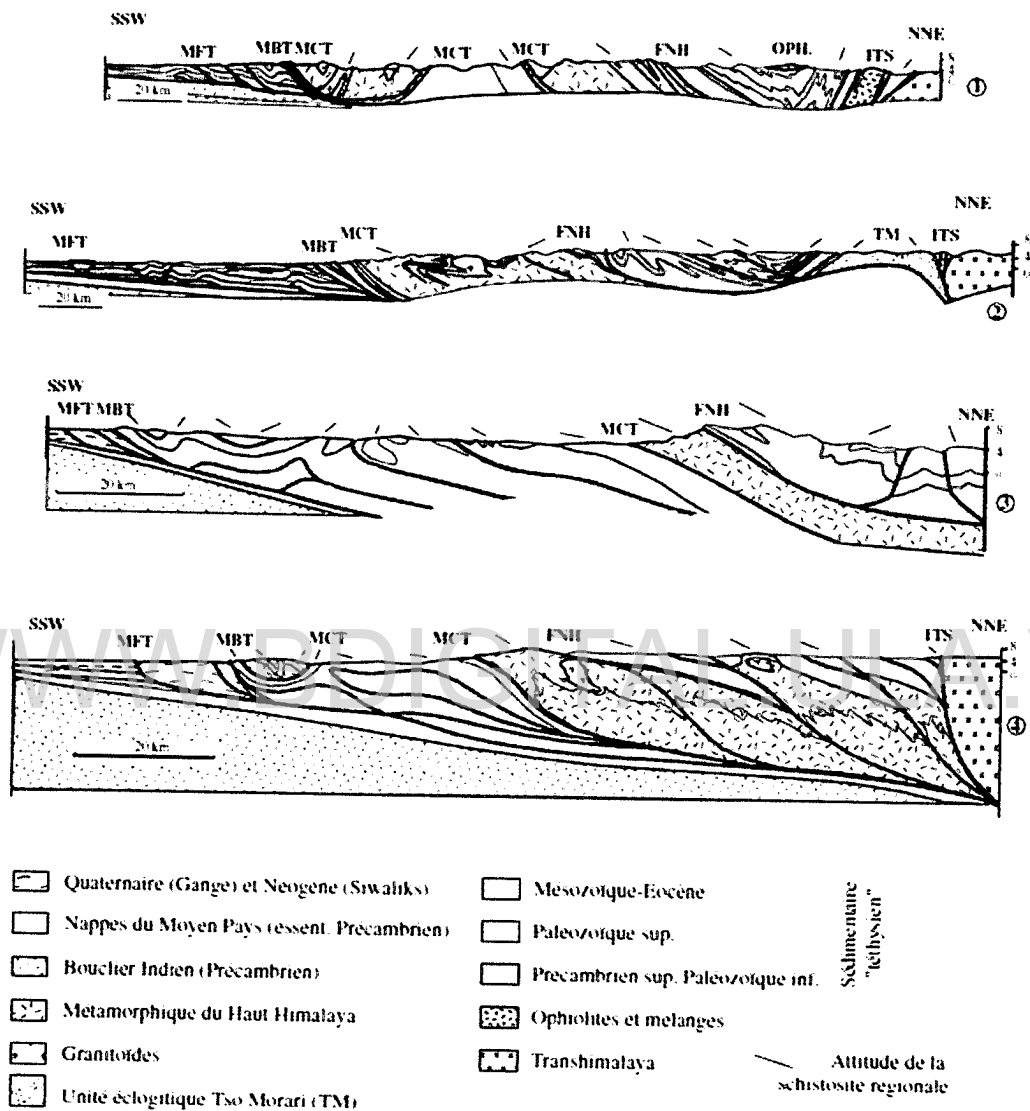


Figura II.9 Cortes geológicos del Himalaya
 (Tomado de Debelmas *et al* 2008)

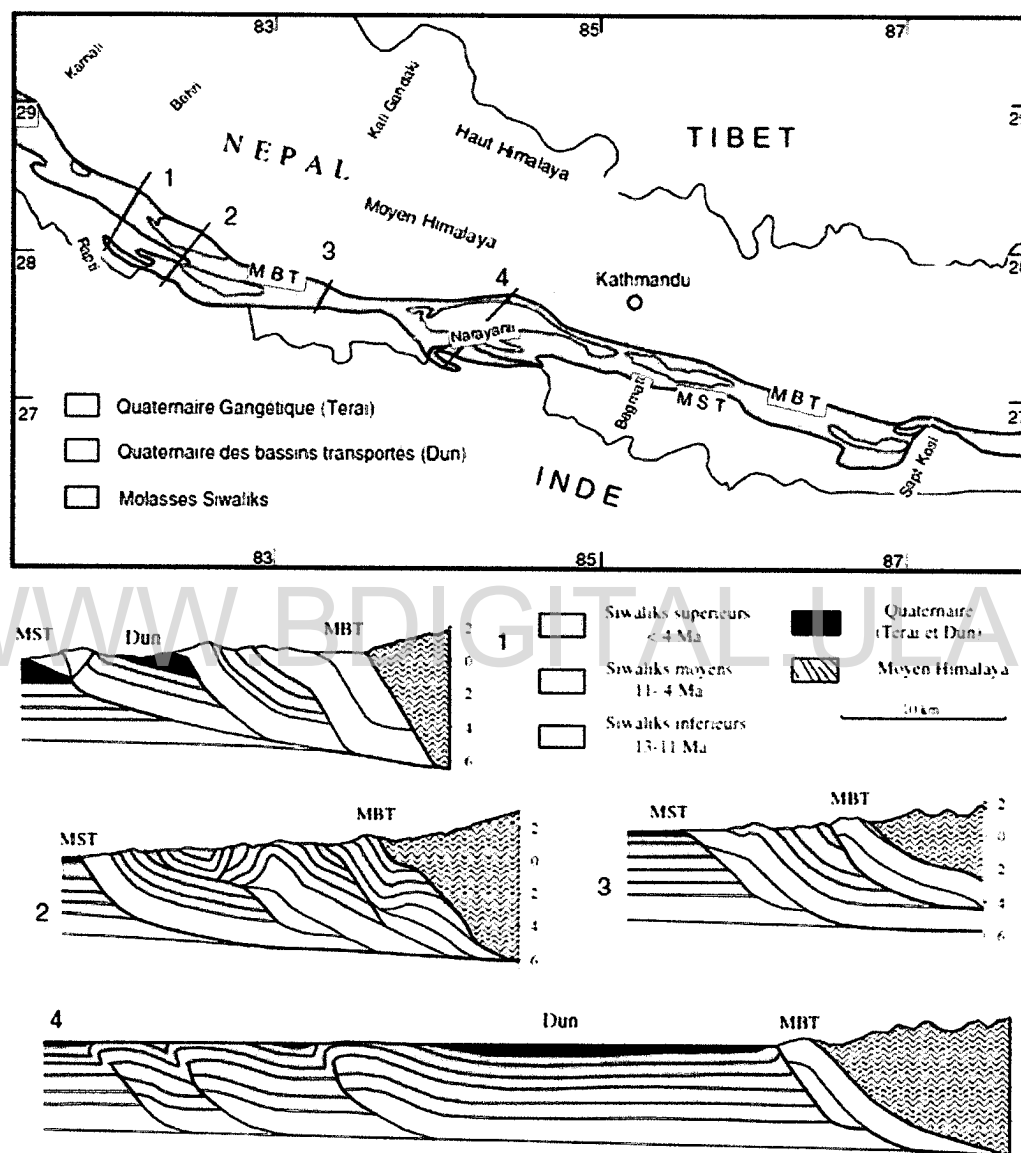


Figura II.10 Estructura del Siwaliks al Nepal
 (Tomado de Debelmas *et al* 2008)

II.2.1.3.2 Placa Hindú

Es una placa tectónica que fue originalmente parte del antiguo continente de Gondwana del que se separó hace cerca de 50-55 millones años, incluye al subcontinente Indio y una porción de la cuenca del océano Índico.

En el período del Cretácico tardío, hace unos 90 millones de años, tras la escisión de Gondwana, la placa hindú se separó de Madagascar. Luego comenzó a desplazarse hacia el norte, con una velocidad de 20 cm/año, y empezó a chocar con Asia hace 50-55 millones de años, en la época del Eoceno de la Era Cenozoica. Durante este tiempo, la placa Hindú cubrió una distancia de 2.000 a 3.000 kilómetros, moviéndose a una velocidad más alta que cualquier otra placa. En el 2007, geólogos alemanes descubrieron que la alta velocidad de desplazamiento de la placa Hindú se debió al hecho de que sólo tiene la mitad del grosor de las demás placas que previamente constituían Gondwana. La colisión con la placa Euroasiática a lo largo de la frontera entre la India y Nepal formó el cinturón orogénico que creó la meseta del Tíbet y las montañas del Himalaya, como sedimentos elevados en capas, de una forma similar a la tierra delante de un arado.

En la actualidad la placa Hindú está desplazándose hacia el noreste con una velocidad de 5 cm/año, mientras que la placa Eurasiática se está desplazando hacia el norte a sólo 2 cm/año. Esto está causando la deformación de la placa Eurasiática, mientras que la placa Hindú se está comprimiendo con una velocidad de 4 cm/año (tomado de: http://es.wikipedia.org/wiki/Placa_Índica).

II.2.1.3.3 Placa Árabe

Es una placa tectónica que ocupa la península arábiga y parte del Oriente Próximo. En ciertas zonas de Turquía, donde se encuentra el límite entre esta placa y la

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Euroasiática, se producen frecuentes terremotos. En tiempos recientes (a escala geológica) la separación de esta placa y la placa africana creó un nuevo espacio que sería rellenado por el mar Rojo. Las placas limítrofes son (tomado de: http://es.wikipedia.org/wiki/Placa_arábica), ver figura II.16:

- Al norte, la placa euroasiática
- Al sur, la placa africana
- Al este, la placa india y la placa euroasiática
- Al oeste, la Placa africana y la placa euroasiática

II.2.1.3.4 Placa Euroasiática

Es una placa tectónica continental que abarca Eurasia, exceptuando el subcontinente indio, Arabia y la parte de Siberia al Este de la Cordillera Verkhoyansk. También incluye la parte oriental del océano Atlántico Norte hasta la dorsal mesoatlántica, totalizando un territorio de unos 67.800.000 km². Las placas con las que limita son (tomado de: http://es.wikipedia.org/wiki/Placa_Euroasiática) ver figura II.16:

- Al Norte la Placa Norteamericana.
- Al Sur la Placa Africana, la Placa Arábica y la Placa Hindú.
- Al Este la Placa Pacífica, la Placa Filipina, la Placa de Okhotsk y la Placa Amuria.
- Al Oeste tiene un borde divergente con la Placa Norteamericana, que da origen a la mencionada dorsal atlántica.

II.2.1.3.5 Orogénesis

La orogénesis se produce en bordes convergentes de placa, es decir en las regiones contiguas al límite entre dos placas litosféricas cuyos desplazamientos convergen (tomado de: <http://biogeo1bxramonlull.files.wordpress.com/2012/04/orogenesis.pdf>).

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

II.2.1.3.5.1 Orogénesis térmica

Se produce cuando una placa subduce por debajo de otra. Se llama orogénesis térmica por la importancia de los fenómenos magmáticos, incluidos los volcánicos, que se ponen en marcha como consecuencia de la fricción entre placas en el plano de Benioff. Según sea la placa cabalgante se puede encontrar dos modalidades de orógenos:

- a) Arcos de islas: son archipiélagos en arco rodeados por el lado convexo por una fosa que marca el límite entre las dos placas. Están formados por islas volcánicas. Las Antillas, las Aleutianas o el arco de Insulindia son ejemplos nítidos de esta estructura.
- b) Cordilleras marginales: la subducción puede arrancar cuando la compresión rompe la litosfera oceánica junto al borde de un continente, poniendo en marcha una convergencia y una subducción que levantan una cordillera en el borde del continente. El caso más típico aparece representado ahora por los Andes.

II.2.1.3.5.2 Orogénesis mecánica

Ocurre cuando el movimiento convergente de dos placas tectónicas arrastra un fragmento continental contra otro. Las fuerzas y movimientos predominantes son horizontales y propiamente mecánicos, con poca participación de procesos volcánicos. Para que la colisión pueda llegar a producirse es preciso primero que la subducción absorba la cuenca oceánica entre dos placas continentales, lo que implica que siempre hay una fase de orogénesis térmica antes de que se produzca la colisión continental. La orogénesis de tipo mecánico ha producido el relieve más importante del planeta, el formado por los Himalayas y la Meseta del Tibet, que se han levantado por el choque de la placa que ahora forma la India, después de que se separara de África Oriental, con el continente eurasiático. En el proceso desapareció el mar de Tetis, del cual el mar Mediterráneo, el mar Negro y los lagos mar Caspio, mar de Aral o el Lop Nor son sus restos.

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

II.2.1.3.5.3 Orogénesis en la historia de la Tierra

La intensidad de la orogénesis no se ha mantenido homogénea en el tiempo, en cada momento de la historia de la Tierra han sido diferentes las partes de la corteza continental afectadas por procesos orogénéticos.

Se llama orogenias o períodos orogénéticos a épocas en la construcción global del relieve. Las más recientes y de las que todavía hay evidencias son:

- a) Orogenia caledoniana: movimientos tectónicos ocurridos hace aproximadamente 400 millones de años. De este plegamiento orogénico surgió la cadena caledoniana, de la que se conservan vestigios en Escocia, península Escandinava, Canadá, Brasil, Norte de Asia y Australia.
- b) Orogenia hercínica o varisca: ocurrió en numerosos puntos del globo terrestre hace 300 millones de años y fue más importante que el plegamiento caledoniano. Este plegamiento afectó a gran parte de Europa Centrooccidental, los Urales, los Apalaches en América del Norte, los Andes, Tasmania, entre otros.
- c) Orogenia alpina: plegamiento orogénico del período terciario, el que todavía no ha cesado. Se inició hace 62 millones de años, con el que se formaron, entre otros, el sistema Alpino-Himalayo, que se extiende desde la Cordillera Cantábrica, los Pirineos y los Alpes hacia el Este, pasando por el Cáucaso, hasta unirse con el mayor núcleo orogénico de ese momento, el Himalaya. También tienen su origen en esta orogénesis las cordilleras mediterráneas meridionales, como las Cordilleras Béticas y el Atlas, o las Montañas Rocosas y los Andes en el continente americano.

II.2.1.4 Mecánica de Sólidos

II.2.1.4.1 Esfuerzo

Es la cantidad de fuerza que actúa sobre una unidad de roca para cambiar su forma ó volumen o ambas cosas; y que puede ser aplicada de manera uniforme en todas las direcciones, o de manera no uniforme en direcciones diferentes (Tarbuck y Lutgens, 1999).

Además, los esfuerzos diferenciales pueden ser:

- Compresivos, los cuales acortan un cuerpo rocoso.
- Tensionales, actúan en direcciones opuestas, por lo que tienden a alargar o a separar la unidad rocosa.

II.2.1.4.2 Deformación

Se refiere a todos los cambios de volumen o de forma que experimenta un cuerpo rocoso. La mayor deformación de la corteza se produce a lo largo de los bordes de las placas, ya que al interaccionar unas con respecto a las otras las fuerzas tectónicas deforman las unidades de rocas afectadas.

Cuando las rocas son sometidas a esfuerzos que superan su propia resistencia, empiezan a deformarse, normalmente plegándose, fluyendo o fracturándose, estas deformaciones pueden ser elásticas o plásticas. Las deformaciones elásticas son reversibles, es decir, la roca volverá a forma y tamaño original cuando cese el esfuerzo, mientras que en la deformación, se producen cambios permanentes, es decir, el tamaño y forma de una unidad de roca es alterada para siempre (Tarbuck y Lutgens, 1999).

II.2.1.4.3 Relación Esfuerzo-Deformación

La relación de éstas dos variables en cuerpo, viene dado por la relación entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas, y hace referencia a cómo se va deformando y cómo va variando el comportamiento del material a lo largo de la aplicación de la carga, o dicho de otro modo, cómo varía la resistencia del material para determinados niveles de deformaciones. Así se tiene:

- El comportamiento antes de llegar a la rotura.
- La forma en que se produce la rotura.
- El comportamiento después de la rotura.

Su estudio se lleva a cabo a partir de ensayos de aplicación de fuerzas compresivas, en donde se registran las curvas esfuerzo-deformación a lo largo de diferentes etapas del proceso. Las rocas presentan relaciones no lineales entre las fuerzas aplicadas y las deformaciones producidas a partir de un determinado nivel de esfuerzos, obteniéndose diferentes modelos de curvas esfuerzo-deformación para los distintos tipos de rocas.

Si debido a la aplicación de una carga sobre un cuerpo rocoso se supera su resistencia de pico (es decir, si la deformación aumenta más allá de la deformación de pico) puede ocurrir que (González de Vallejo *et al* 2004):

- La resistencia de la roca disminuya drásticamente incluso hasta alcanzar un valor aproximado a cero, es decir, que presenta un comportamiento frágil (ver figura II.11(a)).
- La resistencia de la roca decrece hasta un cierto valor después de haberse alcanzado la deformaciones importantes, en este caso, estamos en un comportamiento frágil-dúctil (ver figura II.11(b)).

- La deformación sigue aumentando sin que pierda la resistencia, entonces presenta un comportamiento dúctil (ver figura II.11(c)).

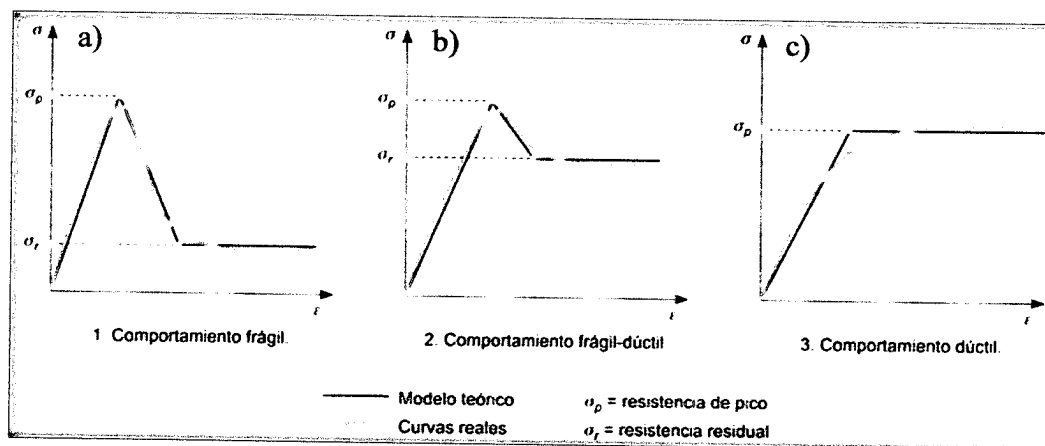


Figura II.11 Modelos de Comportamiento Esfuerzo-Deformación
(Tomado de González de Vallejo *et al* 2004)

Si se ensaya en el laboratorio una probeta de roca sin confinar mediante la aplicación gradual de una fuerza axial, se va produciendo una deformación axial que puede ser medida mediante la instalación de comparadores en la probeta. El registro de los esfuerzos y de las deformaciones correspondientes permite dibujar la curva esfuerzo-deformación del ensayo (ver figura II.12). La rama ascendente de la curva antes de alcanzar la resistencia pico, presenta un comportamiento lineal o elástico para la mayoría de las rocas. En la rama elástica, la deformación es proporcional al esfuerzo y se cumple la relación:

$$E = \sigma / \varepsilon_{ax} \quad (2.1)$$

Donde E es la constante de proporcionalidad conocida como módulo de Young o módulo de elasticidad, σ es el esfuerzo y ε_{ax} es la deformación axial.

Existe otra constante que define el comportamiento elástico de un material, llamada coeficiente de Poisson:

$$\nu = \varepsilon_t / \varepsilon_{ax} \quad (2.2)$$

Donde ε_t es la deformación transversal de la probeta de roca ensayada.

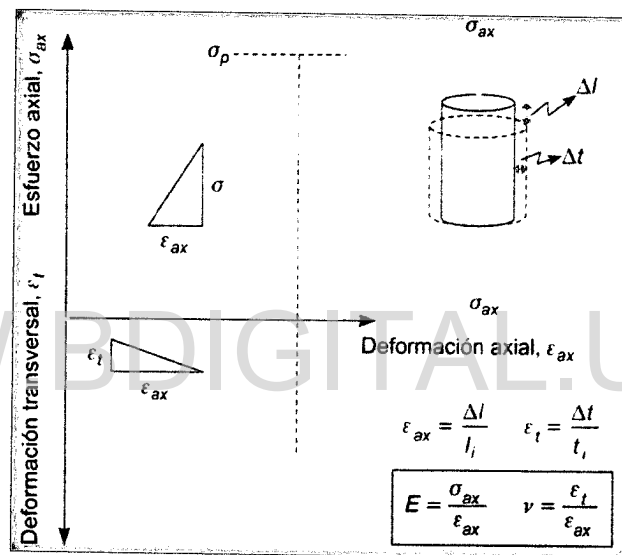


Figura II.12 Curvas Esfuerzo-Deformación obtenidas del ensayo de compresión uniaxial
(Tomado de González de Vallejo *et al* 2004)

En el campo de deformaciones elásticas si se retira la fuerza aplicada se recuperan las deformaciones, volviendo la probeta a su configuración inicial (ver figura II.13). A partir de un determinado nivel de deformaciones, la roca no puede mantener el comportamiento elástico, llegándose a un punto en el que comienzan a producirse deformaciones dúctiles o plásticas, donde se abandona la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación. Este punto se refleja en una inflexión de la curva esfuerzo-

deformación, recibe el nombre de límite de elasticidad, y la resistencia correspondiente se denota como σ_y . A partir de este punto, la roca puede mantener todavía deformaciones importantes antes de llegar al límite de su resistencia.

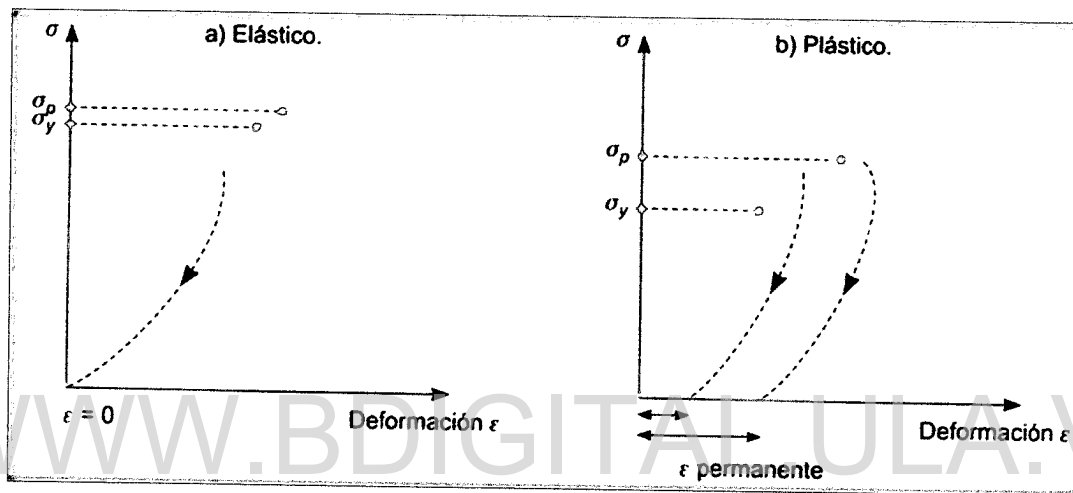


Figura II.13 Modelo de Comportamiento elástico, con deformaciones recuperables una vez retirada la carga, y plástico, con deformaciones permanentes al superarse el límite de elasticidad

(Tomado de González de Vallejo *et al* 2004)

Los aspectos que hemos considerado hasta los momentos no toman en cuenta la influencia del factor tiempo en el comportamiento de la roca bajo unas determinadas condiciones de esfuerzo o deformación mantenidas a largo plazo. Sin embargo, determinados tipos de materiales rocosos, pueden presentar un comportamiento reológico, sufriendo procesos tiempo-dependientes de fluencia (aumento de las deformaciones bajo esfuerzos constantes) y de relajación (disminución de la resistencia bajo deformaciones constantes). Este aspecto es importante porque el material puede evolucionar, y llegar incluso a la rotura, a partir de unas condiciones de carga o deformación mantenidas a lo largo del tiempo (González de Vallejo *et al* 2004).

II.2.2 Elementos Finitos

II.2.2.1 Método de Elementos Finitos

Es un método numérico para solucionar problemas físico matemáticos y de ingeniería. La solución de estos problemas incluye análisis estructural, transferencia de calor, movimiento de los fluidos, transporte de masas y potencial electromagnético (Logan 1993).

El método consiste en dividir un cuerpo cualquiera en pequeños elementos de varias formas, en donde se pueden identificar los puntos de dichos elementos, los cuales se encuentran referenciados respecto a un sistema de coordenadas. Posteriormente, la posición y las propiedades de cada elemento son definidas, de tal manera que los desplazamientos de cada elemento puedan ser relacionados con las fuerzas sobre cada uno de ellos. Finalmente, se constituye una matriz conformada por un sistema que contiene todos los elementos de las estructuras, la cual relaciona los desplazamientos nodales de cada elemento con las fuerzas externas del cuerpo. Una vez que el campo de desplazamientos es determinado, las deformaciones pueden ser evaluadas utilizando las relaciones esfuerzo-deformación (Gutiérrez y Monsalve 2010).

II.2.2.2 Pasos Generales del Método de Elementos Finitos

Esto incluye (Logan 1993):

II.2.2.2.1 Discretización y Selección del Tipo de Elemento

Incluye la división del cuerpo dentro de un sistema equivalente de elementos finitos con nodos asociados y seleccionando el tipo de elemento más apropiado. El número total de elementos usados y su variación en tamaño y tipo dentro del cuerpo, son

temas primordiales de la experiencia ingenieril. La escogencia del elemento a usar mediante el análisis de elementos finitos va a depender de la estructura física del cuerpo bajo las condiciones de cargas a las que se encuentra sometido y a su comportamiento actual. En la Práctica, los elementos que mayormente son empleados se muestran en la figura II.14.

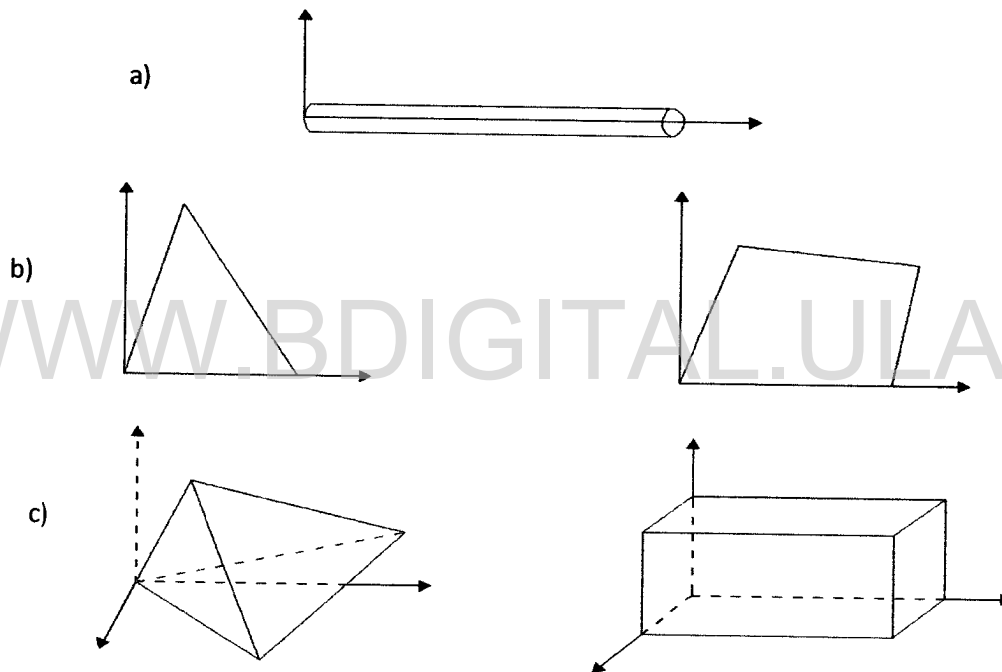


Figura II.14. Tipos de Elementos Finitos
(Tomado y modificado de Logan, 1993)

El elemento lineal primario consiste de una barra (ver figura II.14(a)). Este tiene un área transversal pero comúnmente es representado por un segmento de línea. En general, el área de la sección transversal puede variar dentro del elemento, pero frecuentemente, es considerada constante. Este elemento tiene dos nodos, cada uno ubicado a cada extremo del segmento lineal.

Los elementos bidimensionales básicos (ver figura II.14(b)), son cargados por fuerzas en sus propios planos. Estos son elementos triangulares ó cuadriláteros y tienen nodos únicamente en las esquinas. Estos elementos pueden tener a lo largo de todo, una densidad variable ó constante. Son usados frecuentemente para modelar un amplio rango de problemas ingenieriles.

Los más comunes son los elementos tridimensionales (ver figura II.14(c)). Estos elementos tienen forma de tetraedros y hexaedros. Estos son empleados cuando es necesario llevar a cabo un análisis tridimensional de esfuerzos. Éstos tienen nodos únicamente en las esquinas y con distribución ordenada.

II.2.2.2.2 Generación del Mallado

Una vez seleccionado el tipo de elemento se procede a generar una malla con los mismos. El número total de elementos y nodos a ser empleados en un problema determinado va a depender de la exactitud de los resultados. La malla no tiene que ser uniforme, es decir, que no es necesario que los elementos sean del mismo tamaño. La regla general es generar elementos pequeños en las zonas donde la geometría cambia y los esfuerzos son esperados.

Cada uno de los elementos, pueden tener en teoría diferentes propiedades de materiales. En la práctica, sin embargo, una de las necesidades más difíciles es modelar más de un material y no siempre resulta tan sencillo. El mallado de elementos tendría que ser organizado de tal manera que cada elemento este en la zona de un material (Gutiérrez y Monsalve 2010).

II.2.2.2.3 Selección de la Función Desplazamiento

La función es definida dentro del elemento usando las coordenadas nodales de los elementos. Las funciones lineales, cuadráticas o cúbicas son las más usadas, ya que facilitan el trabajo en la formulación del elemento finito, sin embargo, las funciones trigonométricas también pueden ser empleadas. Para un elemento bidimensional, la función desplazamiento está en función de las coordenadas en ese plano (plano x-y). Las funciones son expresadas en términos de nodos desconocidos, en el caso de los problemas bidimensionales son expresadas en función de las componentes x e y . En general, puede usarse repetidamente la misma función desplazamiento para cada elemento. Por consiguiente, el método de elementos finitos es aquel en el cual una cantidad continua, tal como el desplazamiento a través de un cuerpo es aproximado por un modelo discreto compuesto por un conjunto de piezas de información continua, definida dentro de cada elemento finito (Logan 1993).

II.2.2.2.4 Definición de la Relación Deformación/Desplazamiento

Los componentes de deformación, $\varepsilon^T = \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}$ en cada punto, se relaciona con los desplazamientos de la siguiente manera (Pande y Beer 1990):

a) Planos de esfuerzos o plano de deformación:

$$\varepsilon_x = \partial u / \partial x \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_y = \partial v / \partial y \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_z = 0 \quad (2.5)$$

$$\gamma_{xy} = (\partial u / \partial x + \partial v / \partial y) \quad (2.6)$$

Donde u, v son los desplazamientos a lo largo de los ejes de coordenadas cartesianas X e Y .

- b) Ejes de simetría, en donde se asume que el eje y es el eje de simetría y el eje x es el eje radial.

$$\varepsilon_x = \partial u / \partial x = \varepsilon_r \quad (\text{deformación longitudinal en el eje x}) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_y = \partial v / \partial y = \varepsilon_a \quad (\text{deformación longitudinal en el eje y}) \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_z = u / x = \varepsilon_t \quad (\text{deformación longitudinal en el eje z}) \quad (2.9)$$

Las funciones se pueden escribir como una función de los desplazamientos nodales. Hasta ahora, para el caso de plano de deformaciones se tiene:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = B \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ : \\ : \\ u_n \\ v_n \end{Bmatrix} = B\delta \quad (2.10)$$

Se puede observar que el tamaño de la matriz B es de $(4*2n)$, donde n es el número de nodos del elemento. La matriz B consiste en un número n de submatrices, $B_i (i = 1, 2, \dots, n)$, de tamaño $(4*2)$, cuyos elementos son:

$$B_i = \begin{Bmatrix} \partial N_i / \partial x & 0 \\ 0 & \partial N_i / \partial y \\ \partial N_i / \partial y & \partial N_i / \partial x \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

II.2.2.2.5 Definición de la Relación Esfuerzo/Deformación

Estas relaciones son las incógnitas de todo el análisis, las cuales se pueden expresar de la siguiente manera:

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ...)

$$\Delta\sigma = D_T \Delta\varepsilon \quad (2.12)$$

Donde $\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_z)^T$ es el vector de la componente de la componente de esfuerzos y ε , representa las componentes de deformación correspondientes. D_T , es una matriz cuadrada, la cual es constante en un caso elástico, pero en el caso de un comportamiento no lineal, depende del esfuerzo y la deformación (Pande y Beer 1990).

II.2.2.2.6 Ecuaciones de Rigidez para un Elemento

En primera instancia debe derivarse las ecuaciones de rigidez para cada elemento con el objeto de ensamblarlos posteriormente para obtener la rigidez global de la estructura. Por consiguiente, se considera un elemento típico aislado, es cual está sujeto a unas fuerzas F^e actuando en los nodos, dado por (Pande y Beer 1990):

$$F^e = \begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

Y la deformación asociada con los desplazamientos nodales δ^e está dada por:

$$\delta^e = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

Encontrándose en equilibrio con el principio de trabajo virtual, el cual dice que si una estructura esta en equilibrio, el trabajo realizado por las fuerzas externas a través de un conjunto de desplazamientos virtuales debe ser igual al trabajo realizado por los esfuerzos internos a través de las deformaciones internas (δ^*) como consecuencia de los desplazamientos virtuales aplicados (ε^*).

Aplicando éste principio, se puede decir que:

$$(\delta^*)^T F^e = \int_V (\varepsilon^T) \sigma dV = \int_V (B \delta^*)^T \sigma dV \quad (2.15)$$

Integrando el lado derecho de la ecuación 2.13, la cual está representada sobre el volumen del elemento (V), sustituyendo la ecuación 2.10 en la ecuación 2.15, se tiene que:

$$F^e = \int_V B^T \sigma dV \quad (2.16)$$

Nótese que δ^* son desplazamientos virtuales arbitrarios, los cuales se eliminan para obtener la solución de la ecuación 2.16. La ecuación 2.16 es muy importante y es utilizada para encontrar las fuerzas nodales equivalentes debidas a cualquier campo de esfuerzos que se encuentren en equilibrio. Esta ecuación también puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\Delta F^e = \int_V B^T \Delta \sigma dV \quad (2.17)$$

Donde Δ denota un incremento de la variable. Sustituyendo $\Delta \sigma$ en la ecuación 2.17, desde la ecuación 2.12 y usando la ecuación 2.10, se tiene que:

$$\Delta F^e = \int_V B^T D_T \Delta \epsilon dV \quad (2.18)$$

$$\Delta F^e = \int_V B^T D_T B \Delta \delta^e dV \quad (2.19)$$

$$\Delta F^e = K^e \Delta \delta^e \quad (2.20)$$

Donde,

$$K^e = \int_V B^T D^T B dV \quad (2.21)$$

K^e es la matriz rigidez del elemento. Si D_T es constante, K^e es también constante. Por otra parte, K^e representa una matriz rigidez de tangente variable y solo se aplica a valores de $\Delta \sigma$ y $\Delta \epsilon$ apropiados.

II.2.2.2.7 Rigidez Global

La ecuación individual de cada elemento es generada mediante la ecuación 2.21, las cuales pueden ser añadidas utilizando el método de superposición, también llamado método de rigidez, para de esta manera obtener las ecuaciones globales que conforman la matriz rigidez de toda la estructura. Implícito en el método directo de rigidez está el concepto de continuidad o compatibilidad, el cual requiere que la estructura permanezca junta y que ninguna laceración tenga lugar en la estructura (Pande y Beer 1990).

La ecuación global de rigidez tiene la forma:

$$K \Delta \delta = \Delta R \quad (2.22)$$

Donde $\Delta \delta$ es el vector desconocido de incremento de los desplazamientos nodales debido a un incremento de la fuerza ΔR .

II.2.2.2.8 Cálculo de las Fuerzas Nodales

En el método de elementos finitos todas las fuerzas, incluyendo la gravedad, la temperatura, esfuerzos o deformaciones iniciales, presión de poros, inercia, entre otros, son convertidas en fuerzas equivalentes que actúan en los nodos. En la rigidez de un elemento, se toma en consideración inicial ($\Delta \varepsilon_0$) originada por las fuerzas nodales (ΔR_{e0}) (Pande y Beer 1990).

$$\Delta R_{e0} = \int_V B^T \Delta \sigma_0 dV \quad (2.23)$$

Y un esfuerzo inicial ($\Delta \sigma_0$) causado por las fuerzas de los nodos (ΔR_{e0}) de la forma:

$$\Delta R_{e0}^e = \int_V B^T \Delta \sigma_0 dV \quad (2.24)$$

II.2.2.2.9 Interpretación de Resultados

El propósito es interpretar y analizar los resultados obtenidos para ser empleados en el proceso de análisis y diseño de estructuras. La determinación de la ubicación de grandes esfuerzos y deformaciones en la estructura es importante en la toma de decisiones de análisis de diseño.

II.2.2.2.10 Calibración del mallado y convergencia del modelo

Este es uno de los aspectos importantes a considerar, ya que indica que los modelos realizados convergen, lo que se traduce en buenos resultados. En este sentido, es importante considerar la gráfica teórica mostrada en la figura II.15, la cual fue elaborada por Elberg y Febres (2004). En esta gráfica se notan tres zonas, la primera

de ellas llamada zona I representa un mallado sencillo en la cual los resultados obtenidos no son apropiados; la zona II, es la considerada mejor, sin embargo, es importante verificar que el resultado obtenido sea el correcto, y la zona 3, la cual implica un mallado muy denso, en donde se pueden obtener resultados erróneos que se generan por redondeo.

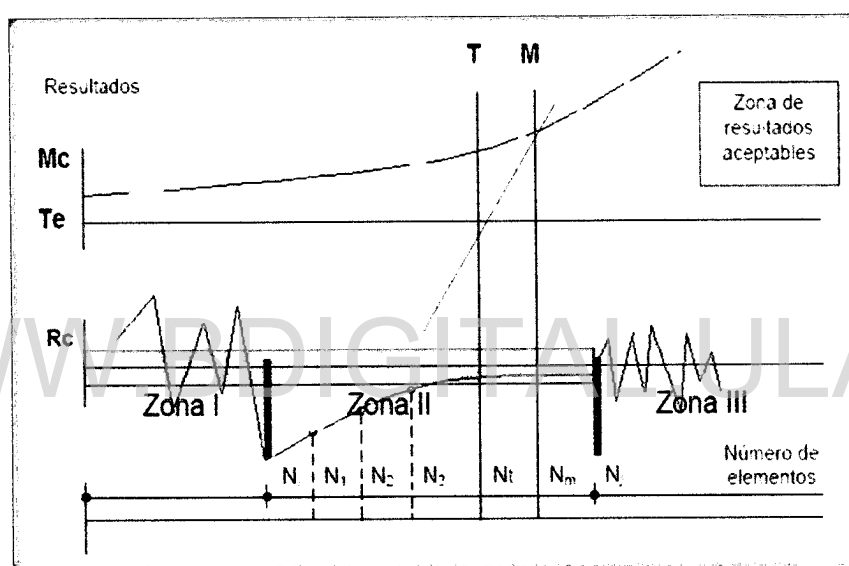


Figura II.15. Curva Teórica de Calibración del Mallado y Convergencia del Modelo

Tomado de: Elberg y Febres, 2004

Donde:

Mc: memoria del computador.

Te: tiempo de ejecución

Rc: resultado correcto.

T: restricción por tiempo del computador.

M: restricción de memoria del computador.

N_i : número: de elementos en el cual comienza la convergencia.

N_1, N_2, N_3 : número de elementos en cada discretización.

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

N_t : número máximo de elementos debido a tiempo de ejecución.

N_m : número máximo de elementos debido a memoria del computador.

N_j : número de elementos en el cual comienza la acumulación de errores.

II.3 Ubicación del Área de Estudio

Las placas Euroasiática, Hindú y Árabe, se encuentran en contacto hacia la parte nororiental del planeta, cuyos límites convergentes dieron origen a la formación de la cordillera montañosa más elevada de nuestro planeta, El Himalaya (ver figura II.16).

La cordillera del Himalaya, ubicada en la planicie fluvial de los ríos Indo, Ganges y Yarlung Zangbo, es la cordillera más elevada del mundo sobre el nivel del mar. Se encuentra en la parte sur de la región autónoma del Tíbet de China, sobre el borde meridional de la meseta Qinghai-Tíbet, con el cuerpo principal localizado entre China y Nepal. Se inicia por el Oeste en la meseta de Pamir y termina por el Este en el viraje del cañón del río Yarlung Zangbo, con 2.400 kilómetros de largo, separando el subcontinente indio de la altiplanicie del Tíbet por una faja en forma curvada de 150-400 kilómetros y una altura de 6.200 metros sobre el nivel del mar (tomado de: <http://spanish.china.org.cn/spanish/190106.htm>).

Entre algunos de los países que abarca el área en análisis se pueden mencionar: China, Nepal, India, Pakistán, Afganistán, Tayikistán, Irán, Arabia Saudita, Irak, Kazajistán, Uzbekistán, Turkmenistán, Kirguistán, Siria, Jordania, Turquía, ver figura II.17.



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MÉRIDA VENEZUELA

CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL.



Figura II.16. Ubicación del Área de Estudio. A: Margen Convergente Árabe-Euroasiática. B: Margen Convergente Hindú-Euroasiática (Modificada de: <http://www.geographos.com/mapas/?p=51>)



**UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MÉRIDA VENEZUELA**

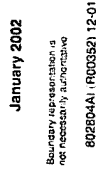


Figura II.17. Países que abarcan el Área de Estudio.
(Modificada de: http://193.147.167.77/images/0/0a/Mapamundi_gran.jpg)

CAPITULO III. METODOLOGÍA

El contexto metodológico aplicado en esta investigación se basa en dos etapas: estudios preliminares y análisis numérico. Los estudios preliminares, comprenden la búsqueda y recopilación de temas relacionados con la investigación. El análisis numérico, se basa en el proceso constructivo desarrollado para los modelos en análisis, a través de las etapas de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento, empleando para ello el programa computacional ABAQUS™.

ABAQUS™ es un programa destinado a resolver problemas de ciencias e ingeniería y está basado en el método de los elementos finitos. El programa puede resolver casi todo tipo de problemas, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales. ABAQUS™ posee una extensa librería de elementos finitos que permite modelar virtualmente cualquier geometría, así como su extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran mayoría de materiales, permitiendo su aplicabilidad en distintas áreas de ingeniería (tomado de: http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales/abaqus/introduccion_abaqus.pdf).

La aplicación del paquete computacional ABAQUS™ se llevó a cabo a través de computadores del Centro Nacional de Cálculo Científico de la Universidad de Los Andes (CeCalCULA), el cual es un centro de supercomputación, que entre sus diversas funciones, se puede nombrar el apoyo a la comunidad estudiantil y de investigación en los diferentes niveles de estudio: pregrado y postgrado.

III.1 Estudios Preliminares

La indagación de tópicos conexos a la investigación, inicia con lecturas que van desde las primeras ideas planteadas durante la teoría de la tectónica de placas hasta las

nuevas tendencias, las cuales, están siendo consideradas como explicativas del movimiento y transformaciones a las que las placas tectónicas han estado sometidas, desde la creación de nuestro planeta a la actualidad. Adicionalmente, se debe adoptar la búsqueda de temas en los que se ha aplicado el Método de Elementos Finitos (MEF) a problemas de índole geológico, mediante herramientas computacionales como ABAQUS™.

III.2 Análisis Numérico

La realización de esta etapa permite determinar, mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos, el comportamiento de las placas tectónicas que dieron lugar a la orogénesis del Himalaya. Este análisis consiste en: creación de la geometría de las placas tectónicas, propiedades de los materiales, condiciones de borde, cargas aplicadas y mallado de las partes, los cuales son aspectos importantes para llevar a cabo la simulación bajo las condiciones del “mundo real”.

III.2.1 Generalidades de los Modelos 3D

Para iniciar el análisis se seleccionan las placas tectónicas causantes de la orogénesis del Himalaya: Euroasiática, Hindú y Árabe, y se determina, en función de su comportamiento geológico actual, el tipo de margen existente, así como también, las propiedades geomecánicas de las capas composicionales de los modelos.

Los modelos a realizar son:

- Contacto Placas Euroasiática-Hindú.
- Contacto Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.

Para los dos modelos se tomará hasta 100 kilómetros de profundidad, elásticos y compuestos solo por litósfera. A continuación se explican los fundamentos geológicos que se consideran para definir el comportamiento existente entre las placas.

III.2.1.1 Límite entre las placas Hindú-Euroasiática

El límite de estas placas es de tipo convergente tal como se explicó en el apartado II.2.1.2.1.2.3, el cual, es el resultado de la colisión entre la corteza continental de la placa Hindú con la corteza continental de la placa Euroasiática.

En la figura III.1, se ilustra el movimiento de la placa Hindú hace aproximadamente 70 millones de años hasta la actualidad, notándose como ésta subduce a la placa Euroasiática, dando origen a la cadena montañosa del Himalaya (<http://www.drgeorgepc.com/Earthquake2001India.html>).

III.2.1.2 Límite entre las placas Árabe-Euroasiática

El límite entre estas dos placas es de tipo convergente (Turcotte y Schubert, 1982), debido a la colisión de la corteza continental de la placa Árabe con la corteza continental de la placa Euroasiática (ver figura III.1c).

III.2.1.3 Límite entre las placas Árabe-Hindú

En base a las características descritas en el apartado II.2.2.1.3, se establece que el contacto entre estas dos placas es de tipo transformante, ubicado al sur de la placa Euroasiática.

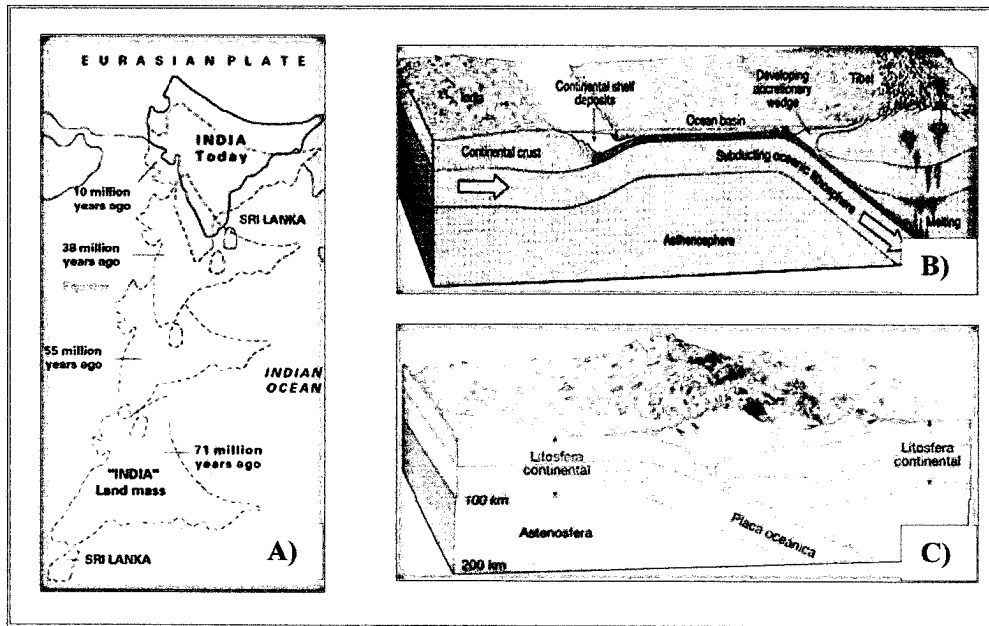


Figura III.1. A) Movimiento de la Placa Hindú hace 70 millones de años a la actualidad. B) Posición de las Placas: Hindú y Euroasiática en el Mesozoico cuando estaban separadas por el océano Thetis. C)

Situación actual después de la colisión de las placas: Hindú y Euroasiática

Tomado y modificado de: <http://j-g-sansegundo.over-blog.es/7-index.html>,
<http://www.drgeorgepc.com/Earthquake2001India.html>

III.2.2 Aplicación del Método de Elementos Finitos

La aplicación del MEF se lleva a cabo a través de la herramienta computacional ABAQUS™, cuya metodología puede ser dividida en tres partes:

III.2.2.1 Pre-Procesamiento

Durante esta etapa, se introduce en los diferentes módulos del programa los datos iniciales de la simulación como: geometría, propiedades, ensamblaje, tipo de análisis, interacciones, cargas aplicadas, condiciones de borde y mallado. Es decir, todas las

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

características que permitan ajustar el modelo en análisis, a las condiciones reales del mismo.

III.2.2.1.1 Creación de la Geometría

La geometría de las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe, se determinan con una investigación a detalle, basada en la toma de imágenes satelitales de las mismas. Estas geometrías se tomaron de estudios recientes realizados por Elberg y Sosa (2008), ver figura III.2.

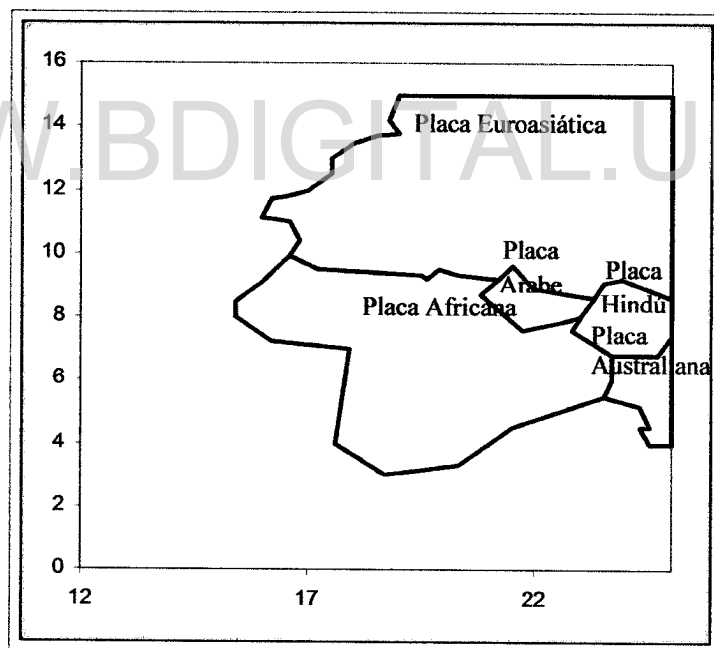


Figura III.2. Geometría de las Placas Tectónicas

Tomado de: Elberg y Sosa (2009)

Posteriormente, las placas son elaboradas en el módulo *Part*, en el cual, se introducen las coordenadas X,Y de cada placa tectónica y finalmente se define el espesor de la extrusión en el plano Z. Las placas en análisis son extruidas en ancho unitario, donde

el mismo, representa los 100 kilómetros de litósfera considerados en el análisis (ver figura III.3).

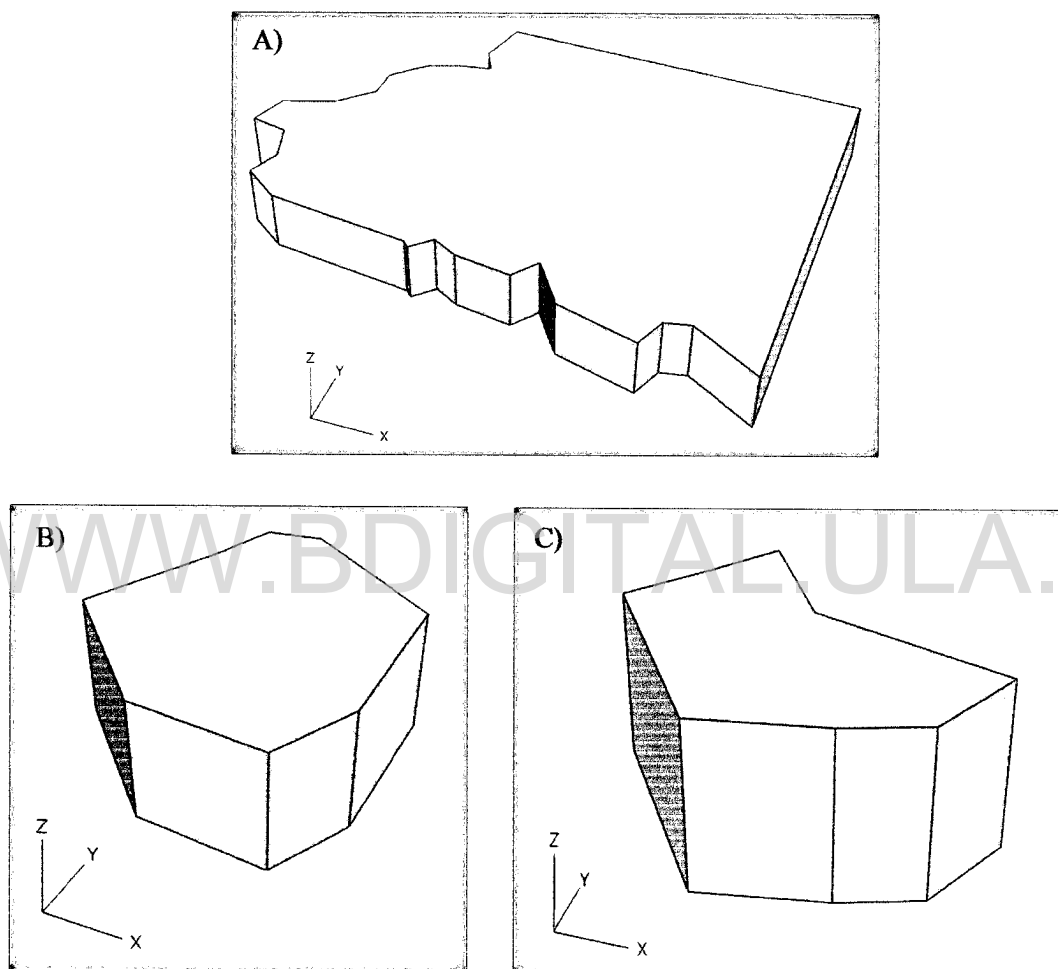


Figura III.3 Geometrías de: A) Placa Euroasiática. B) Placa Hindú. C) Placa Árabe

III.2.2.1.2 Propiedades de los Materiales

Se realiza en el módulo *Property* y consiste en crear y asignar las propiedades de los materiales presentes en el análisis numérico en función del comportamiento de los mismos (elástico, plástico, entre otros).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Para los modelos que se realizan en esta investigación se establece el comportamiento elástico lineal, en el cual, las propiedades de la litósfera se tomaron de Turcotte y Schubert (1982) y son ilustradas en la tabla III.1.

Tabla III.1. Propiedades de la Litósfera

Densidad (γ) kg/km^3	Módulo de Elasticidad (E) N/km^2	Coefficiente de Poisson (ν)
3.36E12	1.62E17	0.28

III.2.2.1.3 Ensamblaje

Consiste en juntar todas las partes geométricas de las placas tectónicas a través del módulo *Assembly*, esto se realiza con la finalidad de que durante la simulación sean consideradas todas las placas que constituyen el modelo a estudiar, y a su vez, todas las partes sean referidas a un mismo sistema de coordenadas.

III.2.2.1.4 Tipo de Análisis

Esta etapa es sencilla, se lleva a cabo en el módulo *Step*, a través de la herramienta *Create Step*, seleccionándose la opción de modelo estático general, usado para la solución de éste tipo de análisis, en el cual se ignoran las fuerzas de inercia, permitiendo que el análisis pueda ser lineal y no lineal.

Por otra parte, en este módulo se seleccionan cada una de las variables de salida que son de interés, para esta investigación se seleccionaron las variables de desplazamiento, esfuerzo y deformación.

III.2.2.1.5 Interacción

Es una de las características más importantes de la simulación, ya que define el comportamiento que debe presentarse durante el contacto entre las placas, es decir de tipo normal o tangencial, seleccionando para este efecto el módulo *Interaction*.

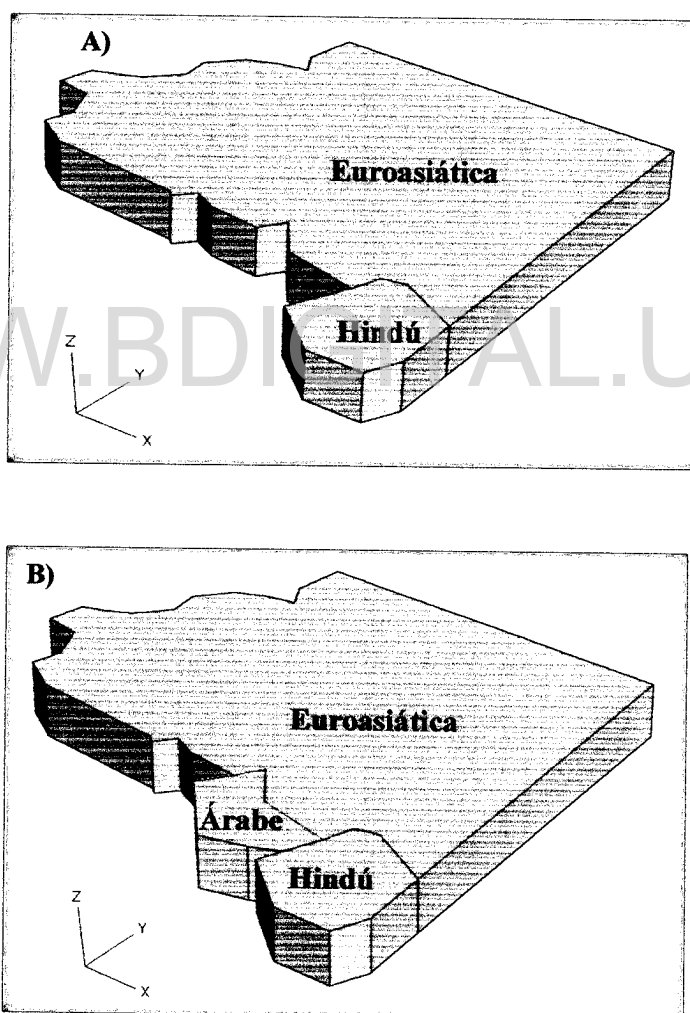


Figura III.4 Ensamblaje de los Modelos: A) Placa Euroasiática-Hindú, B) Placa Euroasiática-Hindú-Árabe

En la figura III.4, se muestra el ensamblaje de las placas para cada uno de los modelos. El tipo de análisis fijado fue el estático general, el cual considera la no linealidad geométrica, de material, así como las producidas por la inclusión de propiedades de contacto y fricción. La interacción establecida para los modelos fue de contacto tangencial, en la cual, la superficie maestra fue la placa Euroasiática y la superficies esclavas las placas Hindú y Árabe.

III.2.2.1.6 Cargas Aplicadas y Condiciones de Borde

Estas características se asignan en el módulo *Load*, en el cual se establecen las condiciones de borde y cargas actuantes, a través de los comandos *Create Boundary Condition* y *Create Load*, respectivamente para las placas tectónicas de estudio, ajustándolas en función del tipo de margen convergente, es decir, colisión de corteza continental con corteza continental.

Las condiciones de borde (CB) que se establecen son el producto de diversas pruebas verificando los empujes de las placas en fuerza de volumen y presiones (CA) obteniendo espacios geológicos conocidos en límites naturales actuales, como alturas promedios del Himalaya. Las fuerzas aplicadas representan al equivalente de los diversos factores geológicos que han producido el movimiento de las placas tectónicas hasta su posición actual.

Los valores de las fuerzas aplicadas en cada uno de los modelos se muestran en la tabla III.2. La variación en magnitud la componente “x” o “y” de cada fuerza responde a que el resultado de la fuerza resultante corresponda a la dirección del vector desplazamiento del movimiento de las placas tectónicas Hindú y Árabe (ver figura III.5).

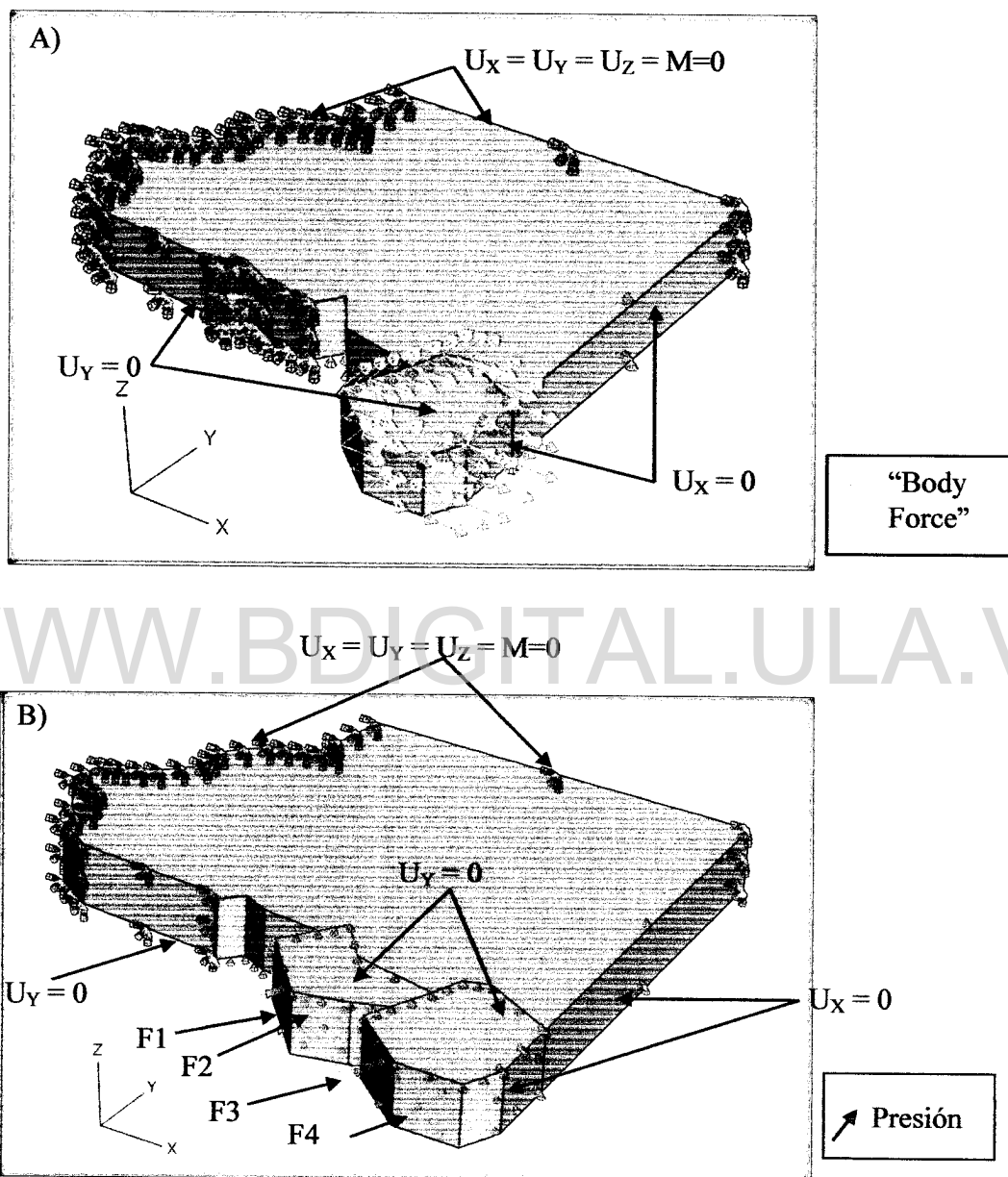


Figura III.5 Condiciones de Borde y Cargas Aplicadas de: A) Modelo Placas Euroasiática-Hindú
B) Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe

Tabla III.2. Valores de Cargas de Empuje

Modelo	Placa Euroasiática-Hindú	Placa Euroasiática-Hindú-Árabe
Tipo de Fuerza	“Body Force”	Presión
	1.5E7 Pa/m en “x”	F1 = F3 = F4 = 3E10 Pa
	3.5E7 Pa/m en “y”	F2 = 2E10 Pa

Los valores de carga mostrados en la tabla III.2 representan fuerzas de empuje requeridas para emular un primer momento de orogénesis del Himalaya, las cuales son validadas con alturas promedios conocidas de la cadena montañosa en estudio, es decir, cercano a los 6000 metros.

III.2.2.1.7 Mallado

Es la división del cuerpo geométrico en un número finito de elementos, cuyo tamaño y tipo varían de acuerdo al tipo de análisis, realizándose en el módulo *Mesh*.

En la figura III.6 se muestra el mallado para los modelos en análisis, compuestos por elementos C3D8R perteneciente a la librería de ABAQUS™, es decir, elementos tridimensionales, hexaédrico, de 8 nodos, con interpolación lineal e integración reducida, es decir, tienen un punto menos de integración en cada dirección, sin restar exactitud a los resultados. La escogencia de este tipo de elemento está referida a que el tiempo de cálculo es menor, y su formulación se basa en la teoría Lagrangiana, donde el elemento se deforma de la misma manera que el material en el que se encuentra establecido.

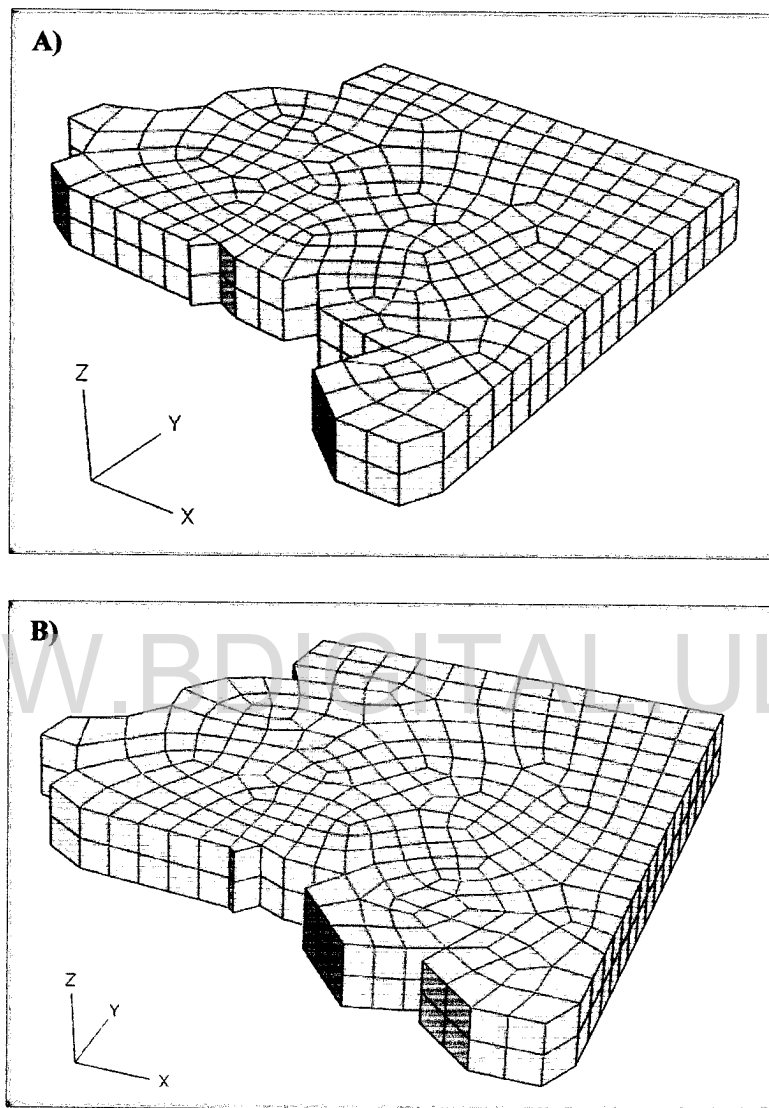


Figura III.6. Mallado de: A) Modelo Placas Euroasiática-Hindú, B) Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe

III.2.2.2 Procesamiento

Es la fase en el cual el programa realiza las iteraciones correspondientes basándose en las ecuaciones del Método de Elementos Finitos, permitiendo obtener los resultados de las variables seleccionadas en el pre-procesamiento.

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

III.2.2.3 Post-Procesamiento

Consiste en la ilustración gráfica de los resultados obtenidos, así como también, la interpretación y convergencia de los mismos. Esta etapa está basada en la cuantificación de valores característicos del levantamiento de la cadena montañosa del Himalaya con base a valores de estados naturales conocidos. Los mismos se presentaran considerando los modelos:

- Placas Euroasiática-Hindú.
- Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta unidad del trabajo muestra los resultados obtenidos en la investigación y sus derivaciones, los cuales son el producto de la aplicación de la metodología explicada en el capítulo III.

La simulación geomecánica de los modelos de las placas Euroasiática-Hindú y Euroasiática-Hindú-Árabe, se llevó a cabo mediante el uso de la herramienta computacional ABAQUSTM a través de la licencia del servidor del Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes (CeCalCULA).

Los resultados de cada modelo se presentan en el siguiente orden: mallado deformado, distribución de esfuerzos y deformaciones, distribución de desplazamientos verticales (U_3), así como también, la calibración del mallado y convergencia del modelo.

Finalmente se presenta un análisis comparativo entre la distribución de desplazamientos en la dirección U_3 y su similitud con imágenes de altimetría y batimetría real del área en estudio. Las imágenes de batimetría reflejan el relieve submarino medido a partir del nivel del mar, mientras que, las imágenes de altimetría muestran el relieve existente por encima del nivel del mar.

IV.1 Modelo Placas Euroasiática-Hindú

IV.1.1 Mallado Deformado

Es la primera derivación a considerar, ya que da una visión de las deformaciones que puedan sufrir las placas en estudio luego de efectuarse la colisión entre las mismas. La figura IV.1 muestra el mallado inicial del modelo y, en la figura IV.2, se observa

la posición aproximada del mallado deformado para el conjunto de placas tectónicas, donde los vectores rojos representan la dirección de deformación del mallado, debido a la compresión de esta margen convergente. El tipo de elemento empleado fue C3D8R, para un total de 520 elementos.

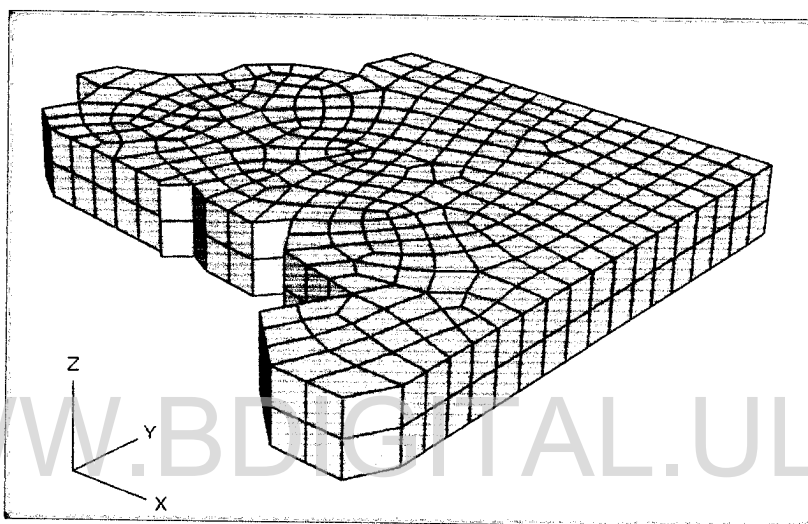


Figura IV.1 Mallado Inicial. Placas Euroasiática-Hindú

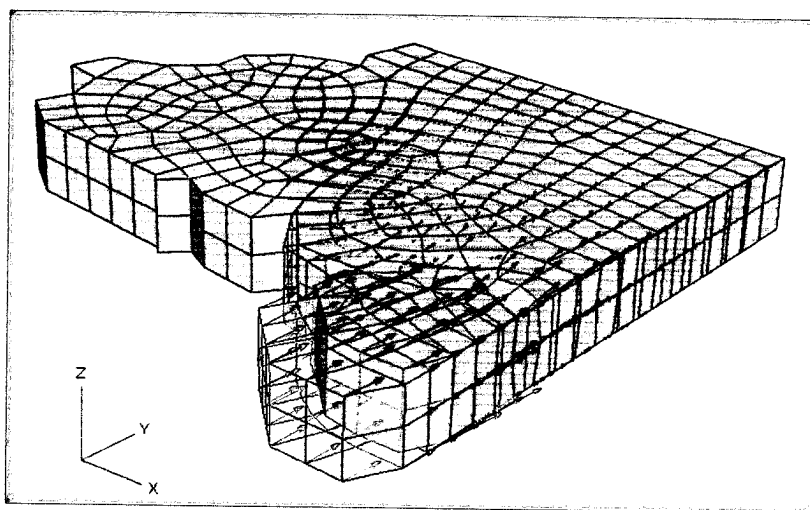


Figura IV.2 Mallado Deformado. Placas Euroasiática-Hindú

IV.1.2 Distribución de Esfuerzos

El convenio de signos usado por ABAQUS™ para la distribución de esfuerzos corresponde a esfuerzos a tracción positivos y esfuerzos a compresión negativos.

En la figura IV.3, se muestran los esfuerzos máximos principales y sus valores correspondientes, los cuales se producen en el contacto de las placas Euroasiática-Hindú, siendo éstos representativos del régimen compresivo que se produce en este margen convergente, y esto, se ve reflejado por la ocurrencia de sismos en dichas zonas con magnitudes mayores a 8 en la escala de Richter como por ejemplo: Bihar Nepal en 1934, Kangara en 1905 y Pakistan en el 2005.

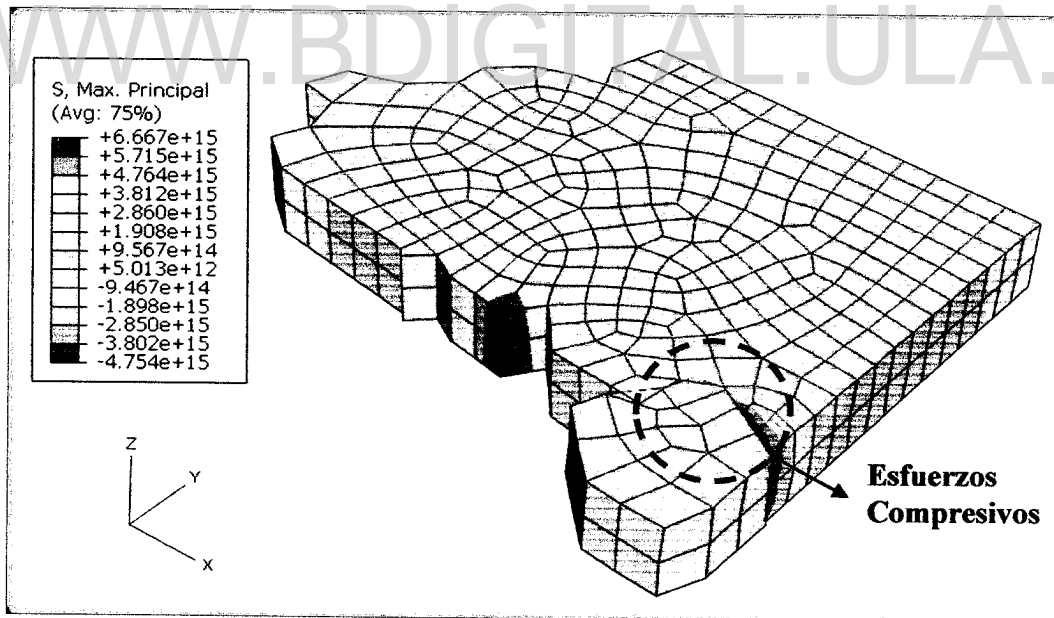


Figura IV.3. Distribución de Esfuerzos Máximos. Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior

En la figuras IV.4, IV.5 Y IV.6 se muestran que los máximos esfuerzos a compresión se registran en el borde de contacto de las placas que conforman el modelo, registrando valores de $1.481 \times 10^{16} \text{ N/km}^2$, $2.591 \times 10^{16} \text{ N/km}^2$ y $5.351 \times 10^{15} \text{ N/km}^2$ en las direcciones S_{11} , S_{22} , y S_{33} , respectivamente.

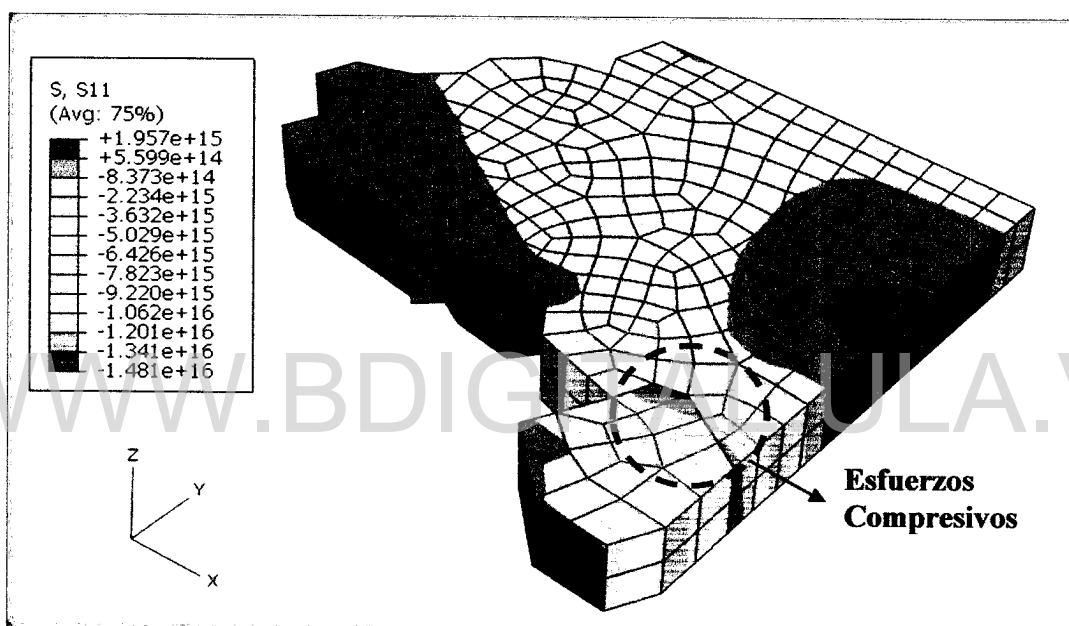


Figura IV.4. Distribución de Esfuerzos S_{11} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior

La tabla IV.1 muestra que los esfuerzos máximos principales, en función de los ejes coordenados xyz , tienen componente dominante en la dirección S_{22} , los mínimos principales en la dirección S_{33} y los medios principales en la dirección S_{11} . Estos resultados pueden ser verificados con la dirección de los vectores en que se producen dichos valores mostrados en la figura IV.7, es decir, el modelo muestra adecuadamente el comportamiento tectónico del área en análisis.

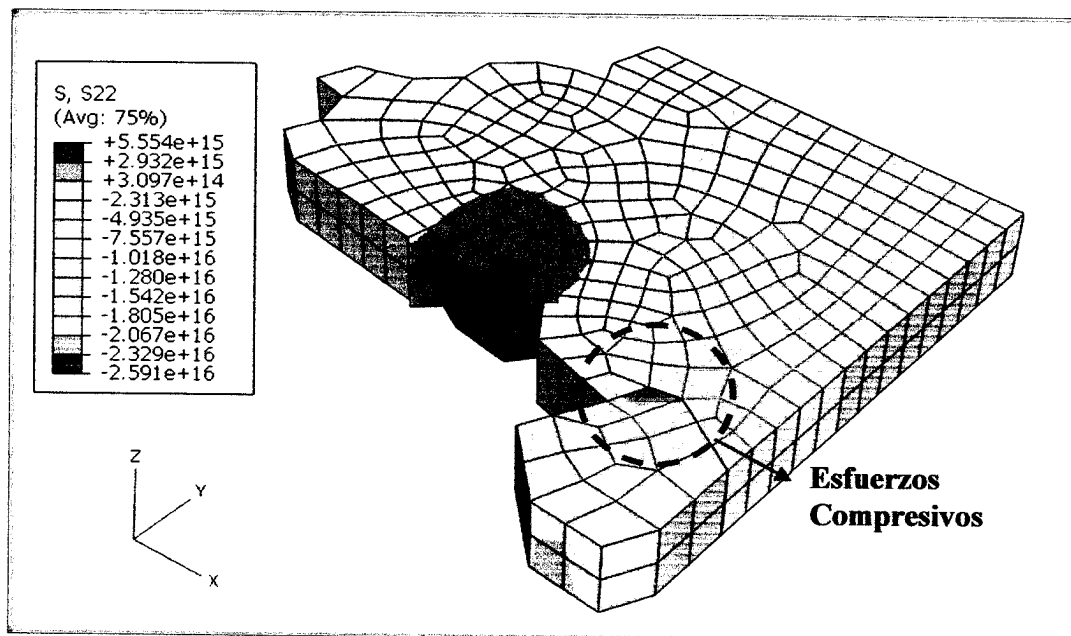


Figura IV.5. Distribución de Esfuerzos S_{22} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior

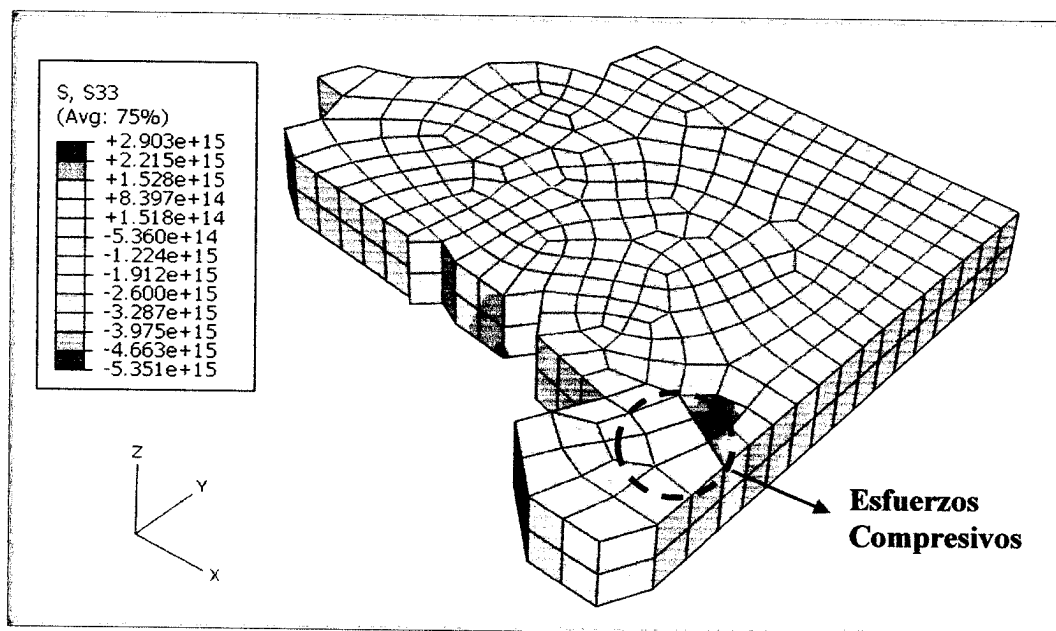


Figura IV.6. Distribución de Esfuerzos S_{33} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior

Tabla IV.1 Valores de Esfuerzos (N/km^2) en el área de contacto entre las placas
Euroasiática-Hindú

S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{12}	S_{13}	S_{23}
-1.481E16	-2.591E16	-5.351E14	-1,919E15	-5.632E14	-1.715E15

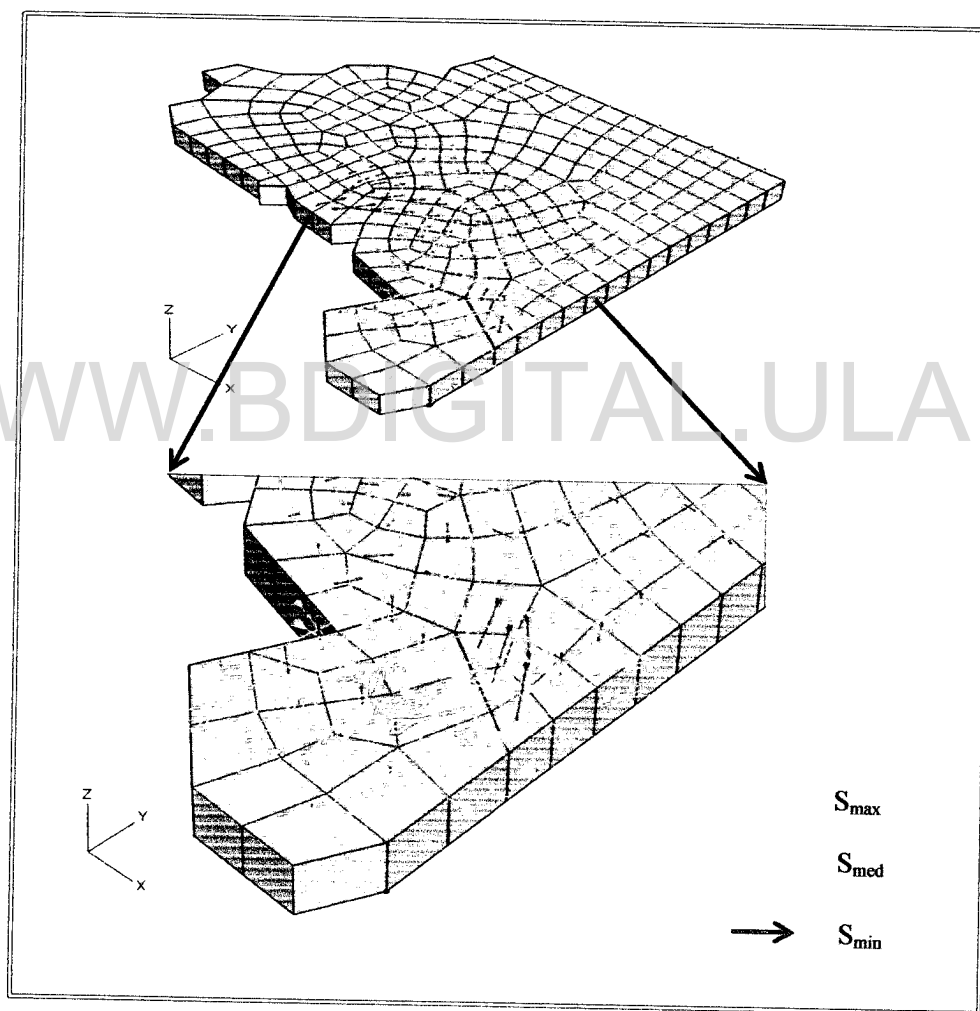


Figura IV.7. Vectores de Esfuerzos Máximos, Medios y Mínimos. Modelo Placas Euroasiática-Hindú.

IV.1.3 Distribución de Deformaciones

Las deformaciones obtenidas corresponden con la distribución de esfuerzos mostradas en el apartado anterior de este modelo, siendo máximas en la zona de contacto entre ambas placas tal como se muestra en la figura IV.8, cuyos valores en las diferentes direcciones se muestran en la tabla IV.2.

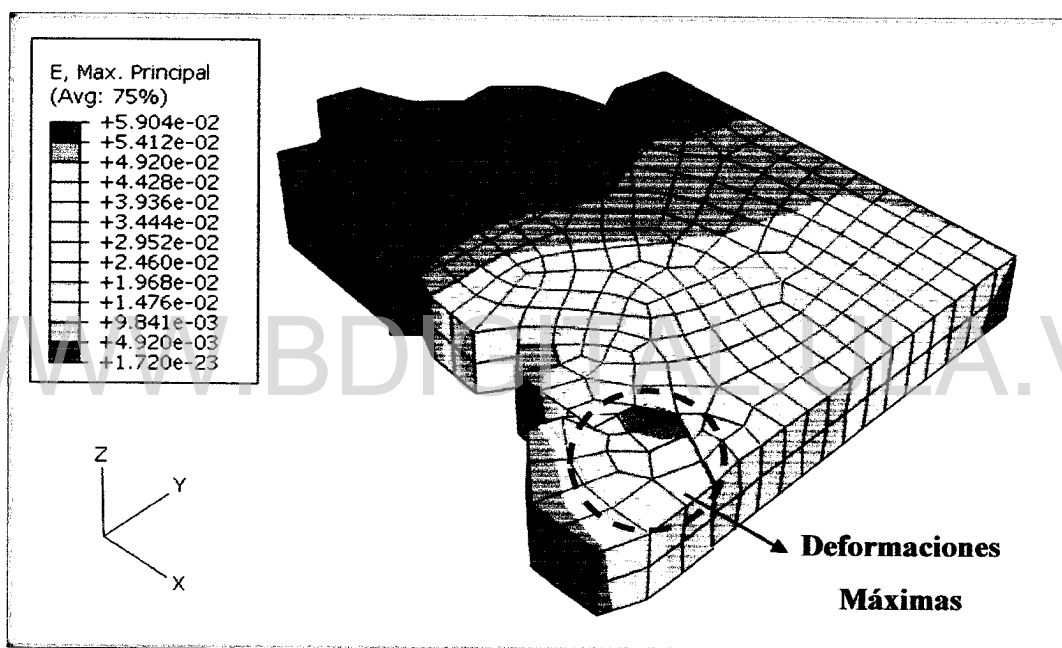


Figura IV.8. Distribución de Deformaciones Máximas. Modelo Placas Euroasiática-Hindú.
Vista Superior

Tabla IV.2 Valores de Deformaciones Máximas del contacto entre las placas
Euroasiática Hindú

E_{11}	E_{22}	E_{33}	E_{12}	E_{13}	E_{23}
2.478E-02	2.784E-02	5.876E-02	1.193E-01	2.261E-02	2.163E-02
-5.269E-02	-1.311E-01	-6.066E-03	-3.032E-02	-8.900E-03	-2.710E-02

En las figuras IV.10, IV.11 y IV.12 se observa que los máximos valores se dan en el borde de contacto de las placas Euroasiática-Hindú, alcanzando valores máximos de 5.269×10^{-2} , 1.311×10^{-1} y 5.876×10^{-2} en las direcciones E_{11} , E_{22} , y E_{33} , respectivamente. Estos valores, pueden estar en rangos plásticos al ser comparados con valores teóricos de deformaciones en rocas como granito y basalto, donde alcanzan deformaciones máximas en el rango elástico de 0,0035 y 0,0033 respectivamente, ver figura IV.9.

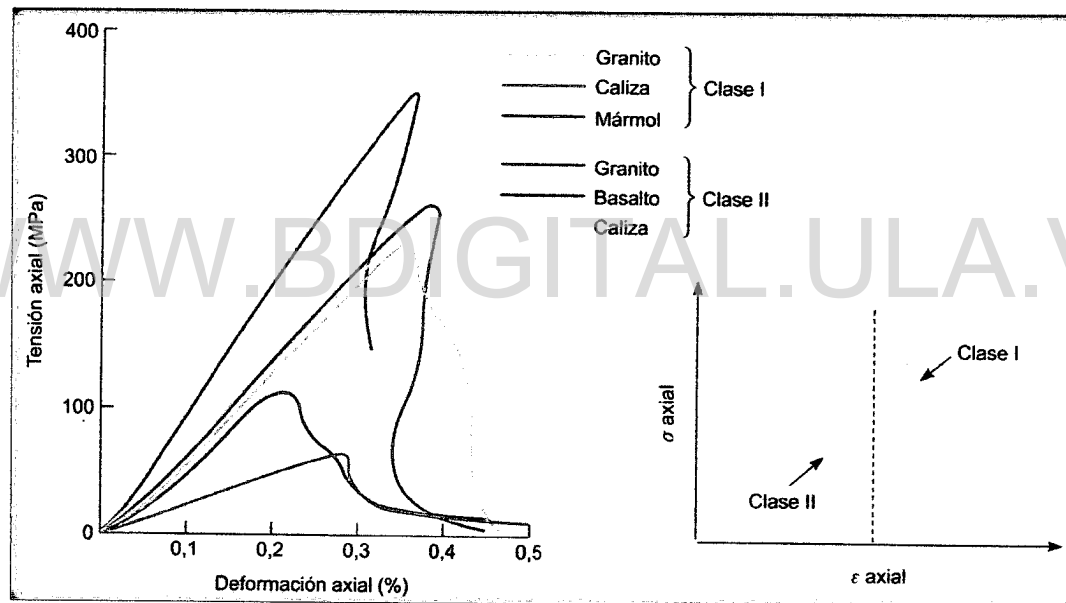


Figura IV.9. Comportamiento Esfuerzo-Deformación en Rocas

Tomado de: González de Vallejo *et al* 2004

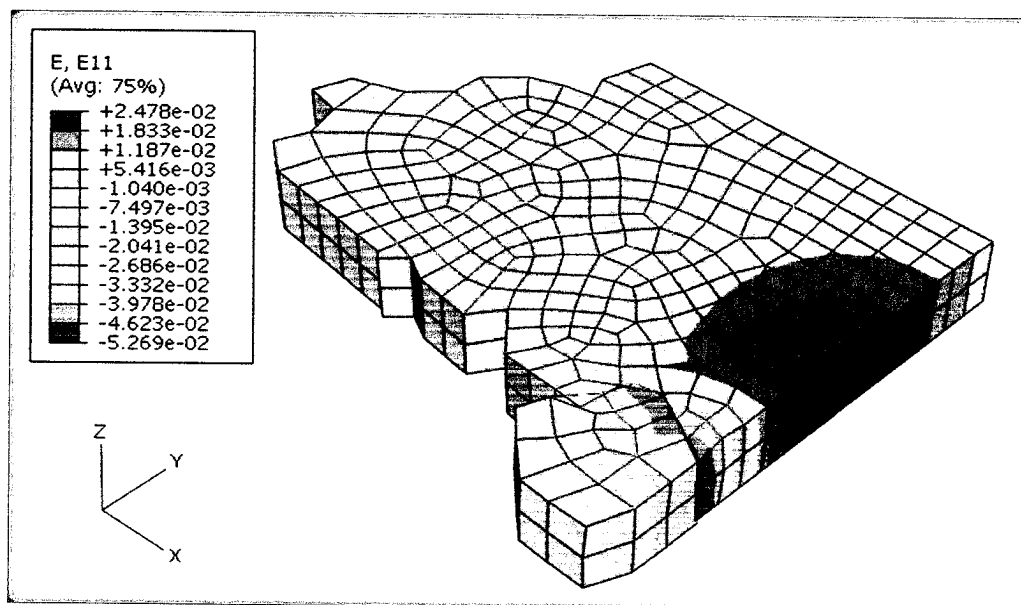


Figura IV.10. Distribución de Deformaciones E_{11} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior

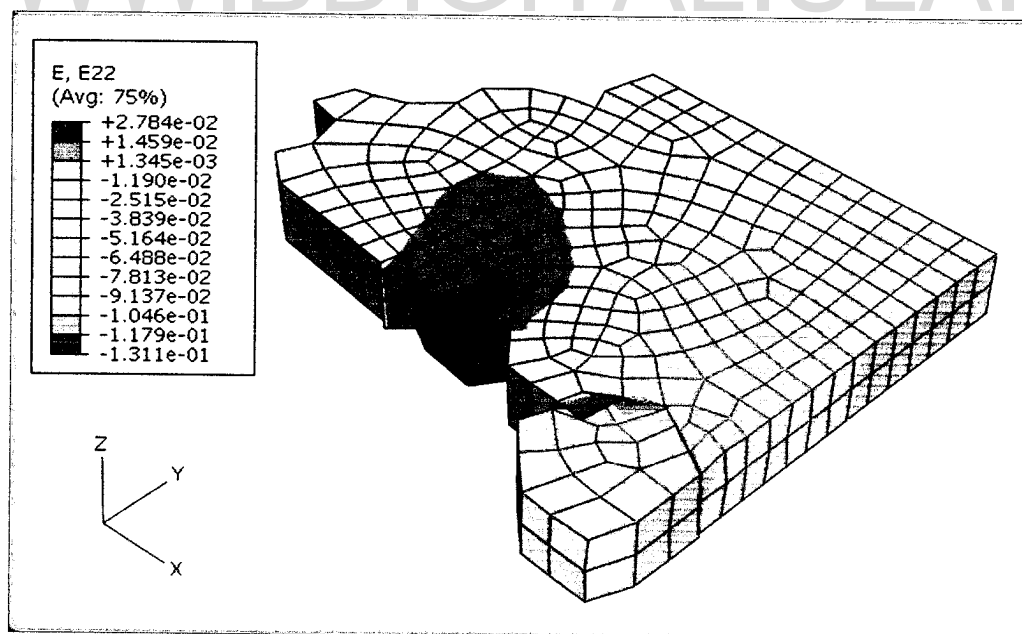


Figura IV.11. Distribución de Deformaciones E_{22} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior

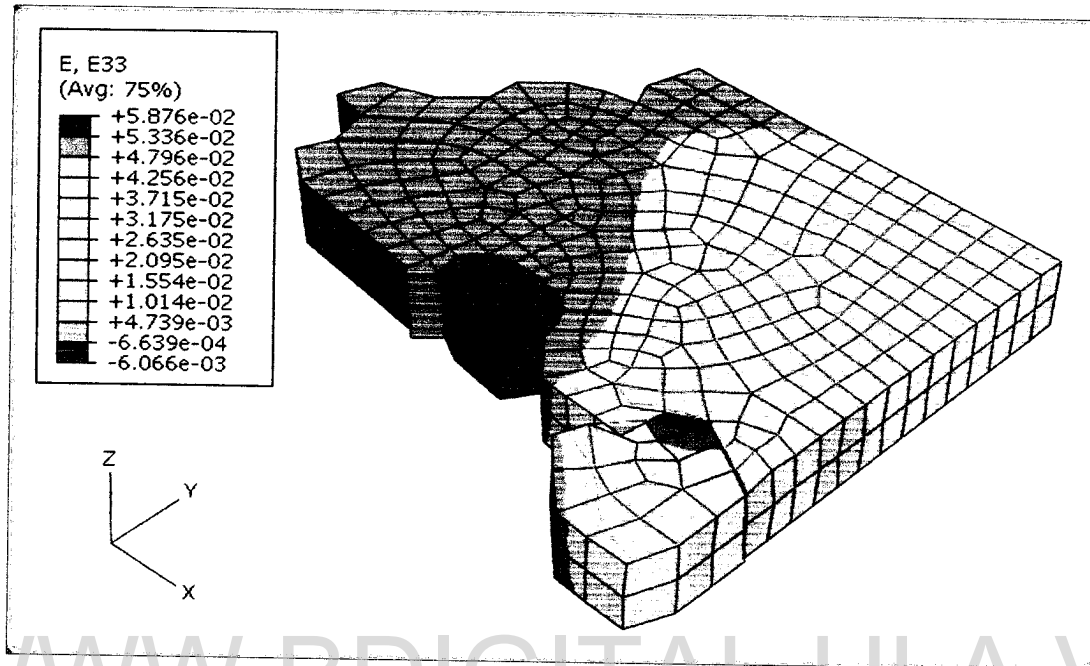


Figura IV.12. Distribución de Deformaciones E_{33} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior

IV.1.4 Distribución de Desplazamientos

La distribución de desplazamientos verticales positivos obtenidos para este modelo son muy próximos, 5693 metros, a la distribución de desplazamientos reales que se encuentran en la cadena montañosa del Himalaya, en donde la altura promedio es de 6000 metros (ver figura IV.13), sin embargo, esta diferencia no representa discrepancia puesto que éstos valores corresponden al primer momento del levantamiento del orógeno en estudio.

A su vez, las figuras IV.14 y IV.15 ilustran el plano de subducción en la colisión de las placas Euroasiática e Hindú, observándose como la placa Hindú subduce a la placa Euroasiática, cuyo proceso de colisión y de empuje producen grandes elevaciones en esta importante cadena montañosa.

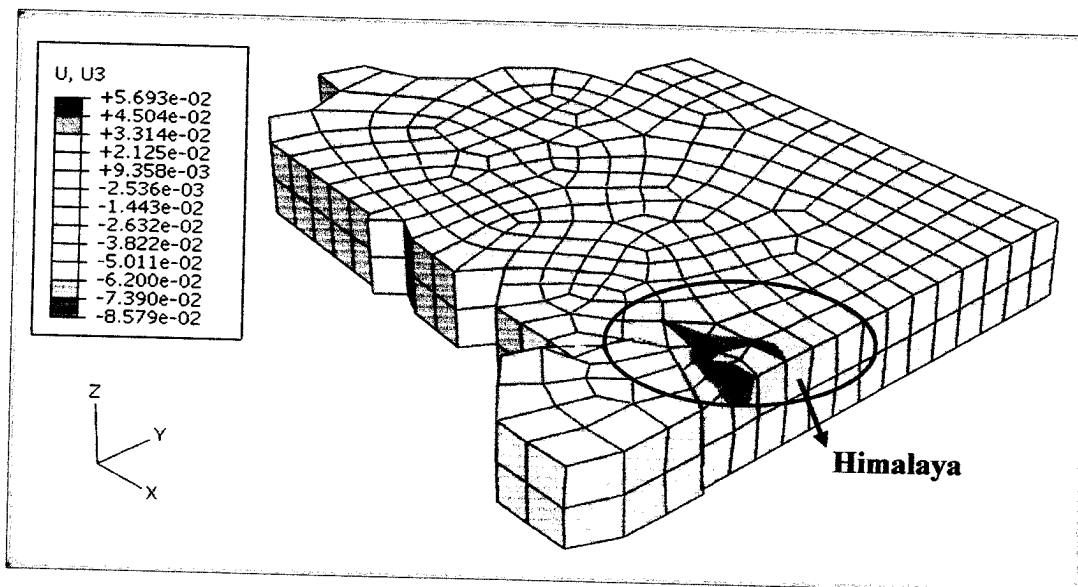


Figura IV.13. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Superior

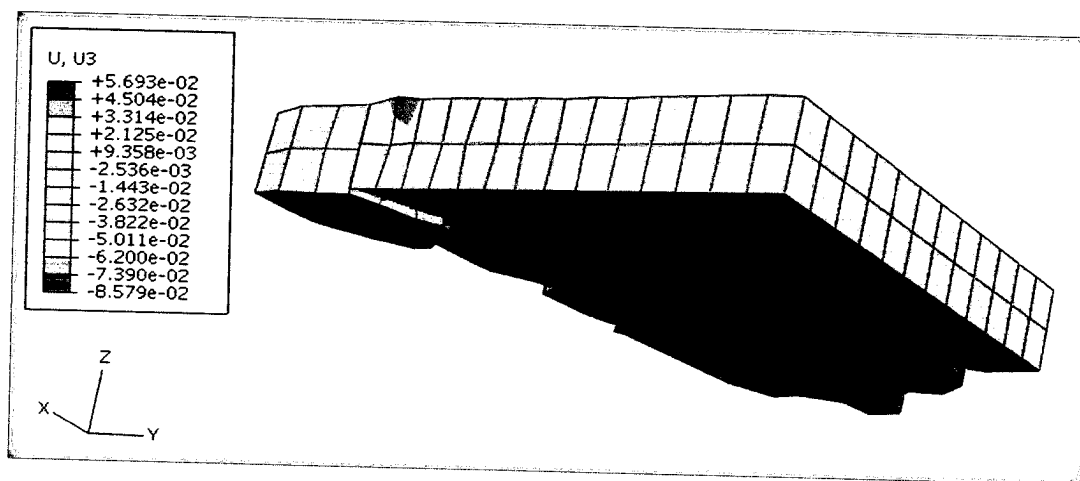


Figura IV.14. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú. Vista Inferior.

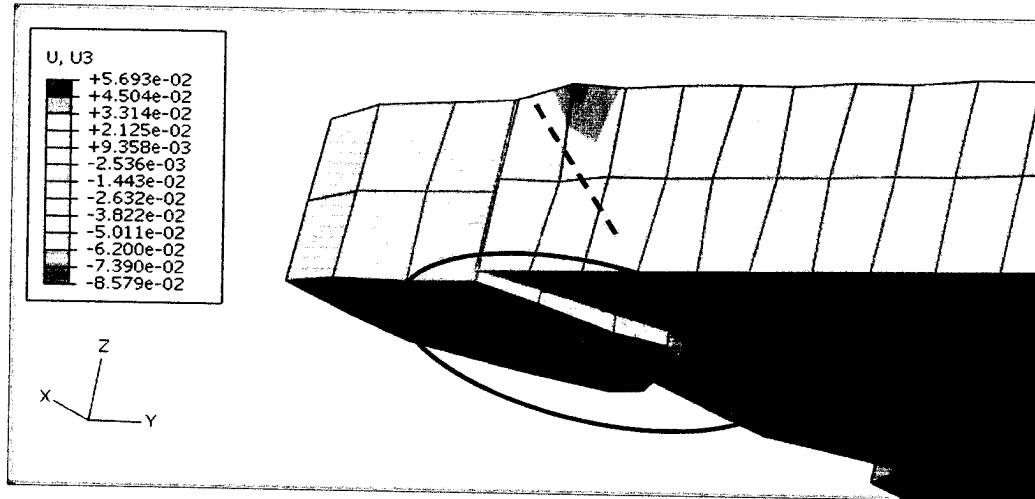


Figura IV.15. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú.

Detalle de Subducción y Plano de Subducción

IV.1.5 Calibración del Mallado y Convergencia del Modelo

Este aspecto como ya fue descrito en el capítulo II, es fundamental, ya que refleja si los modelos elaborados arrojan resultados correctos y se comportan según las condiciones reales del medio geológico en análisis. La tabla V.3 y figura IV.16, refleja su aplicación a la variable geonumérica de desplazamiento en la dirección U_3 . La escogencia de esta variable se basa en la facilidad de poder comparar alturas conocidas con valores obtenidos en el modelo, en este sentido, se observa como la variable U_3 comienza a converger para 120 elementos (N_i), estabilizándose en 576 elementos (N_j), para el cual se obtuvo un valor de desplazamiento máximo en U_3 de 5693 metros (R_c). Por tal razón, se considera que la distribución de desplazamientos en U_3 es apropiada.

Tabla IV.3 Calibración del Mallado. Modelo Placas Euroasiática-Hindú

Número de Elementos	Desplazamiento, U3, metros
70	3518
75	3420
90	4680
120	4514
142	5558
520	5693
576	5693

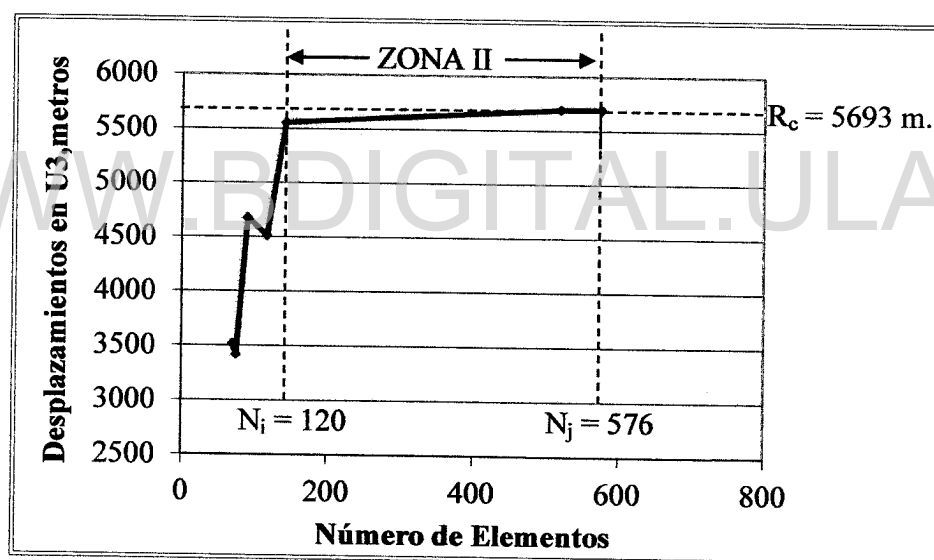


Figura IV.16. Convergencia del Modelo. Placas Euroasiática-Hindú

Donde:

R_c : resultado correcto.

N_i : número: de elementos en el cual comienza la convergencia.

N_j : número de elementos en el cual comienza la acumulación de errores.

IV.2 Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe

IV.2.1 Mallado Deformado

En la figura IV.17 y IV.18, se ilustra el mallado inicial y mallado deformado respectivamente, representando el comportamiento que presentan este conjunto de placas bajo el margen compresivo al que están sometidas, siendo los vectores rojos indicativos de la dirección de deformación de las placas en estudio. El tipo de elemento empleado fue C3D8R, para un total de 544 elementos.

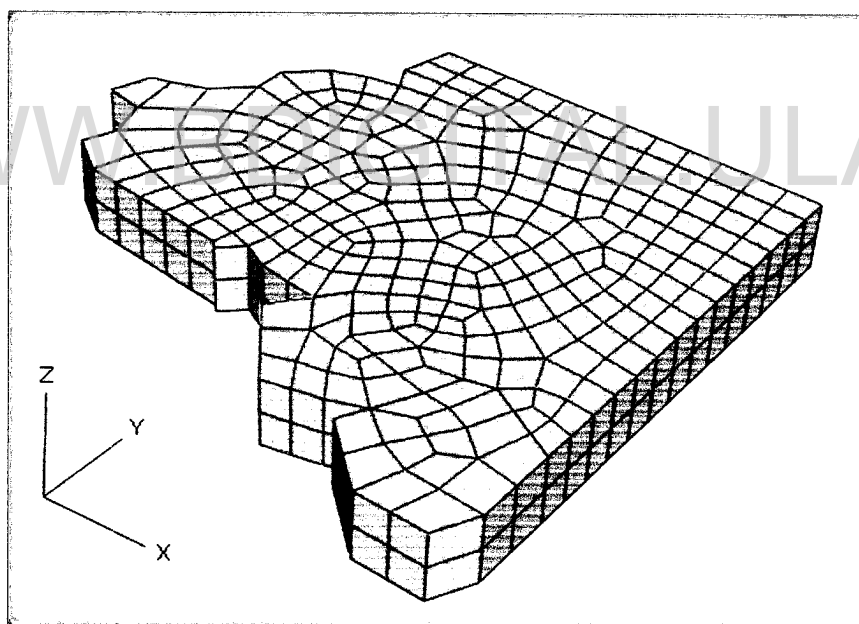


Figura IV.17 Mallado Inicial. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe

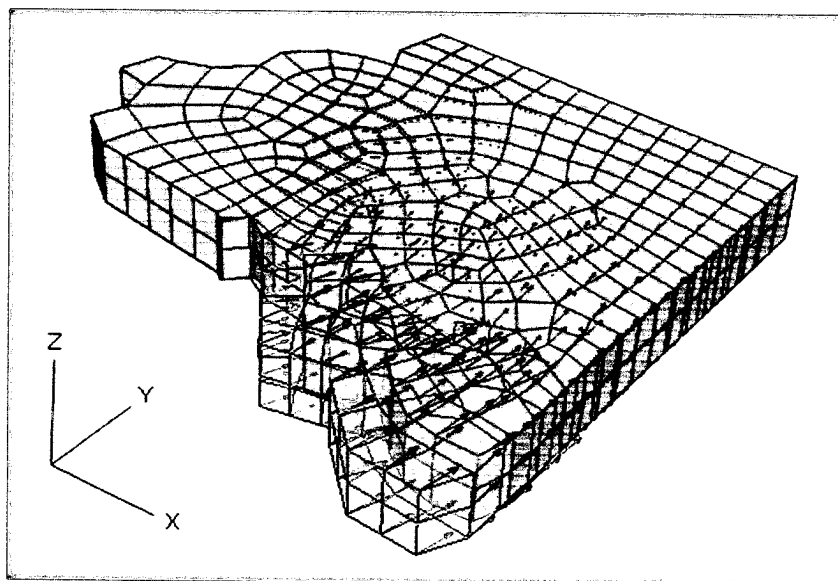


Figura IV.18 Mallado Deformado. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe

IV.2.2 Distribución de Esfuerzos

La distribución de esfuerzos, igual que en el modelo de las placas Euroasiática-Hindú, registra sus valores máximos en el borde de contacto de las placas Euroasiática con las placas Hindú y Árabe, siendo esto una característica típica de este tipo de borde convergente, produciéndose un acortamiento en la dirección de los esfuerzos máximos dando origen a la orogénesis de la cadena montañosa del Himalaya (ver figura IV.19 y Tabla IV.4).

Esta concentración de esfuerzos compresivos es la que diversos autores como Monsalve *et al* en el 2009, le atribuyen la responsabilidad como causa potencial de la mayoría de terremotos en esta zona tal como se muestra en la figura IV.20.

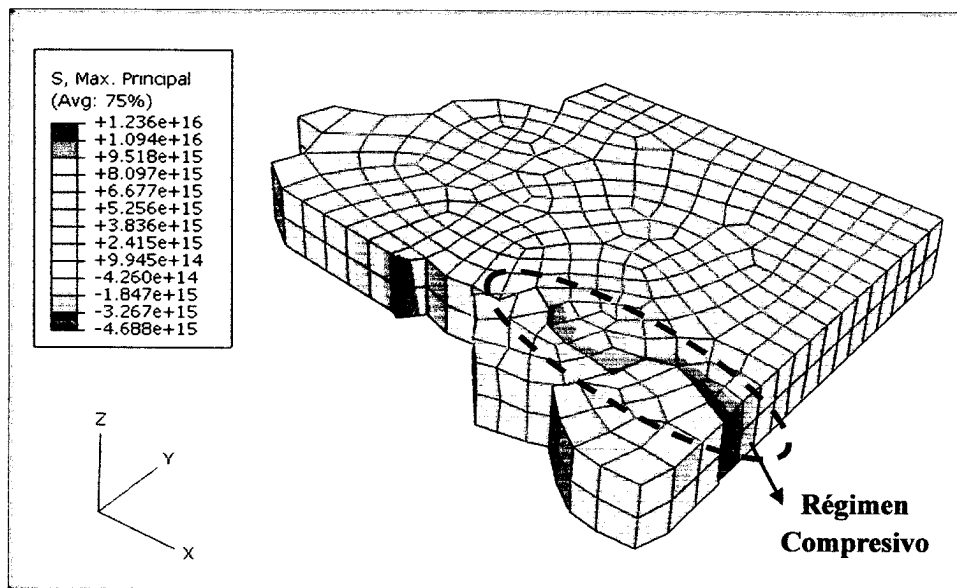


Figura IV.19. Distribución de Esfuerzos Máximos. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Arabe
Vista Superior

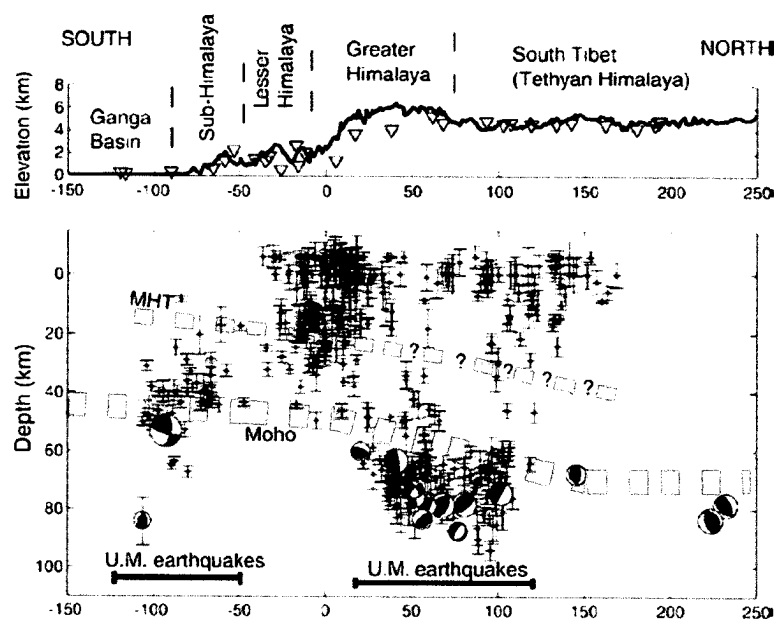


Figura IV.20. Relocalización de eventos sísmicos locales en una sección perpendicular al Himalaya
(Tomado de: Monsalve *et al* 2009)

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, I.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Los máximos valores de esfuerzos a compresión registrados toman valores de 1.878×10^{16} N/km², 2.411×10^{16} N/km² y 5.383×10^{15} N/km² en las direcciones S_{11} , S_{22} , y S_{33} , respectivamente, siendo estos localizados sobre el borde de contacto de las placas Hindú y Árabe con la placa Euroasiática, ver figuras IV.21-23.

Tabla IV.4 Valores de Esfuerzos (N/Km²) del contacto entre las placas
Euroasiática-Hindú-Árabe

S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{12}	S_{13}	S_{23}
-1.878E16	-2.411E16	-5.383E15	-7.441E15	-1.203E15	-1.819E15

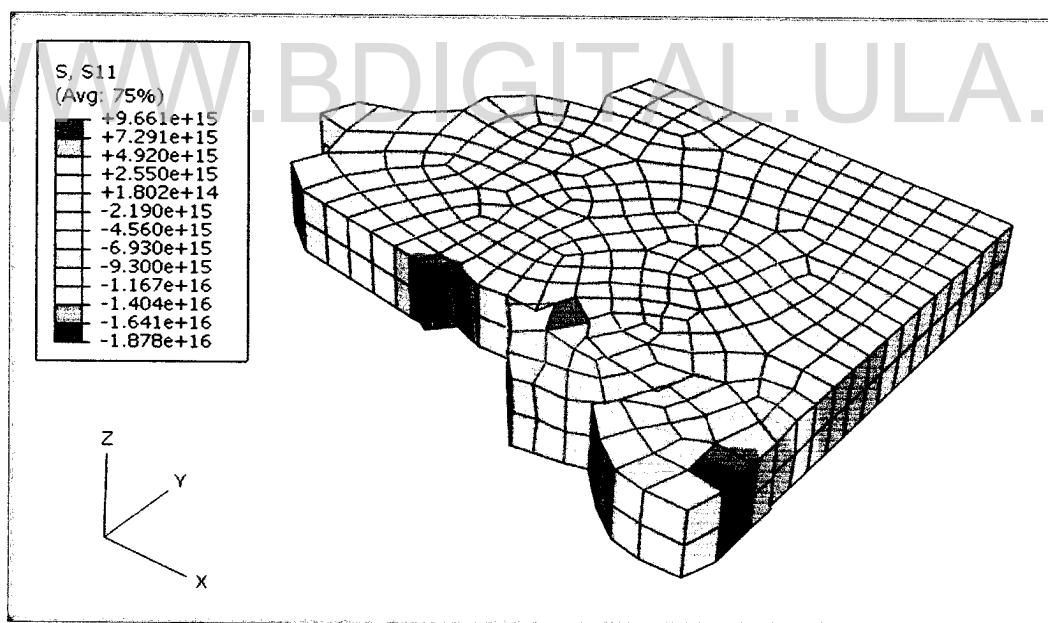


Figura IV.21. Distribución de Esfuerzos S_{11} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior

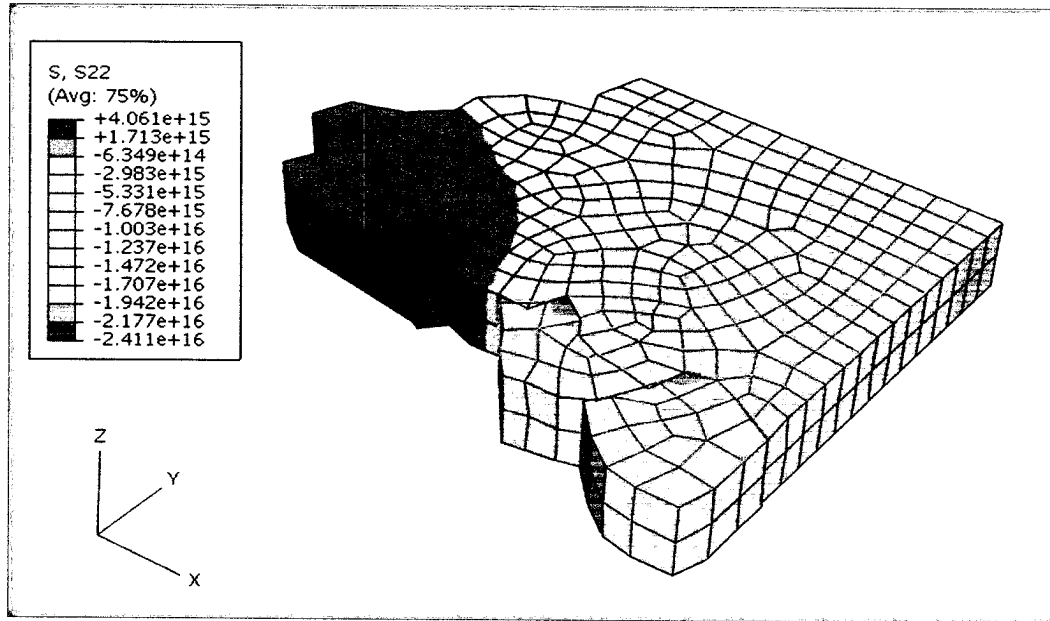


Figura IV.22. Distribución de Esfuerzos S_{22} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior

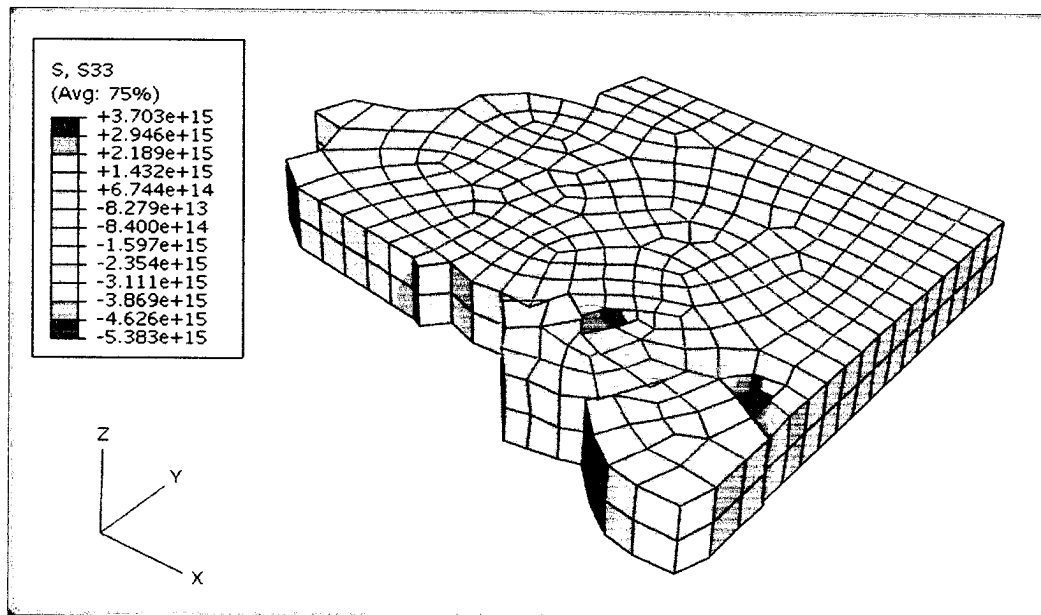


Figura IV.23. Distribución de Esfuerzos S_{33} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior

La figura IV.24 muestra como los vectores de esfuerzos máximos compresivos tienen componente dominante en la dirección S_{22} , correspondiente la distribución de esfuerzos máximos compresivos en el área de contacto de las placas Hindú y Árabe con la placa Euroasiática, siendo este aspecto característico del régimen compresivo del área en análisis. Los esfuerzos medios se producen en la dirección S_{11} y los mínimos en la dirección S_{33} .

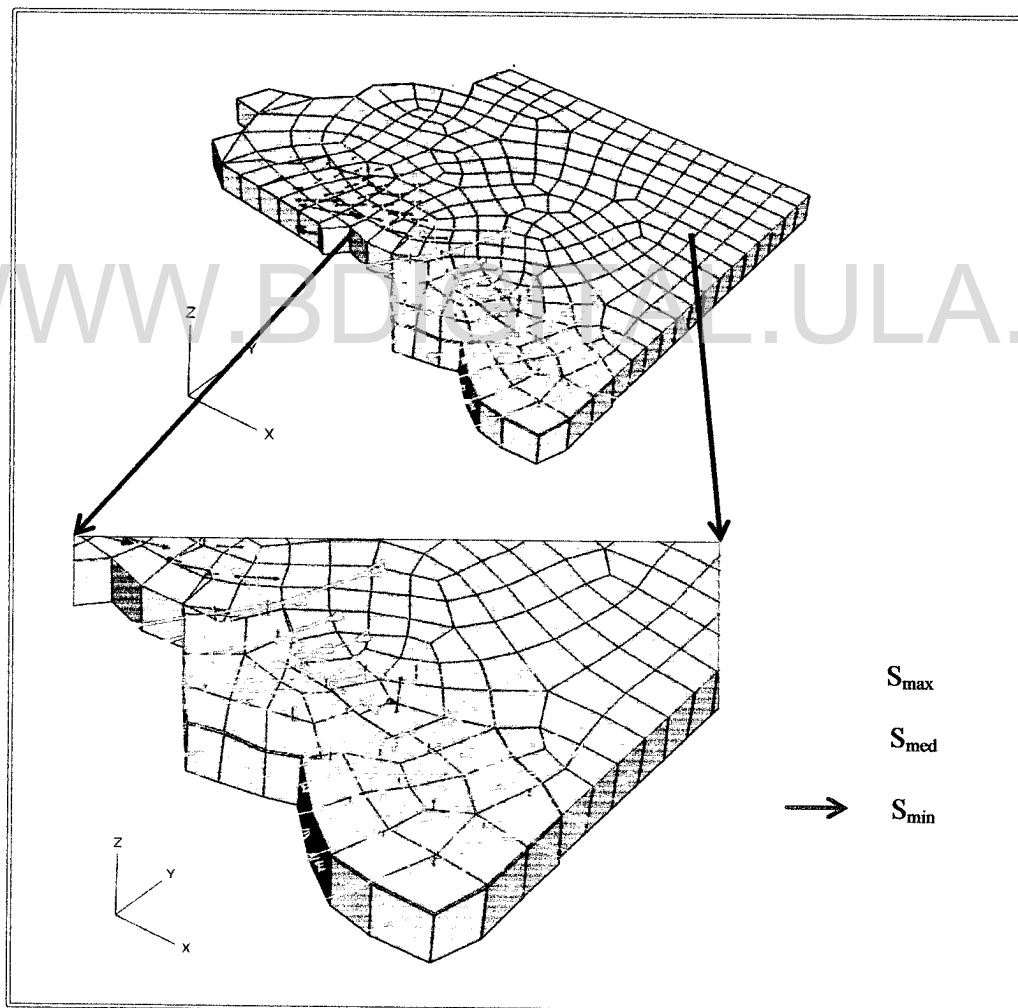


Figura IV.24. Vectores de Esfuerzos Máximos, Medios y Mínimos. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.

IV.2.3 Distribución de Deformaciones

La distribución de deformaciones para este modelo, registra el máximo valor en el límite de contacto de las placas Euroasiática e Hindú, cercano a 6.661×10^{-2} , mientras que en el borde de contacto de las placas Euroasiática y Árabe, este valor disminuye a 4.239×10^{-2} . Esta distribución es adecuada, ya que como se explicará más adelante en el análisis comparativo, la cadena montañosa del Himalaya presenta su mayor expresión, en cuanto a elevaciones, en el contacto de las placas Hindú y Euroasiática, ver figura IV.25.

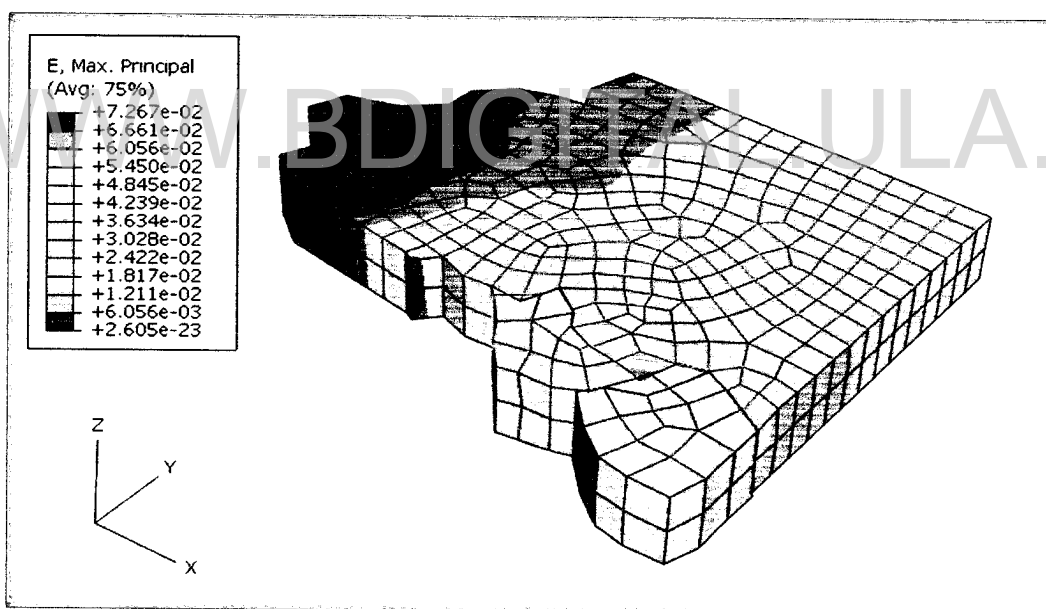


Figura IV.25. Distribución de Deformaciones Máximas. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.
Vista Superior.

Tabla IV.5 Valores de Deformaciones Máximas del contacto entre las placas
Euroasiática-Hindú-Árabe

E_{11}	E_{22}	E_{33}	E_{12}	E_{13}	E_{23}
5.160E-02	1.410E-02	5.655E-02	1.148E-01	1.616E-02	2.149E-02
-9.017E-02	-1.195E-01	-1.461E-02	-1.176E-01	-1.901E-03	-2.874E-02

En la tabla IV.5 y figuras IV.26-27, se observa que las deformaciones en las direcciones E_{11} , E_{22} , y E_{33} , toman valores máximos en el borde de contacto de 9.017×10^{-2} , 1.195×10^{-1} y 5.655×10^{-2} , respectivamente. Estos valores, como ya se explicó en el modelo de las placas Euroasiática-Hindú, pueden estar en rangos plásticos y su comparación con valores teóricos es válida ya que tanto en el modelo de las placas Euroasiática-Hindú como Euroasiática-Hindú-Árabe no se incluyó el factor temperatura.

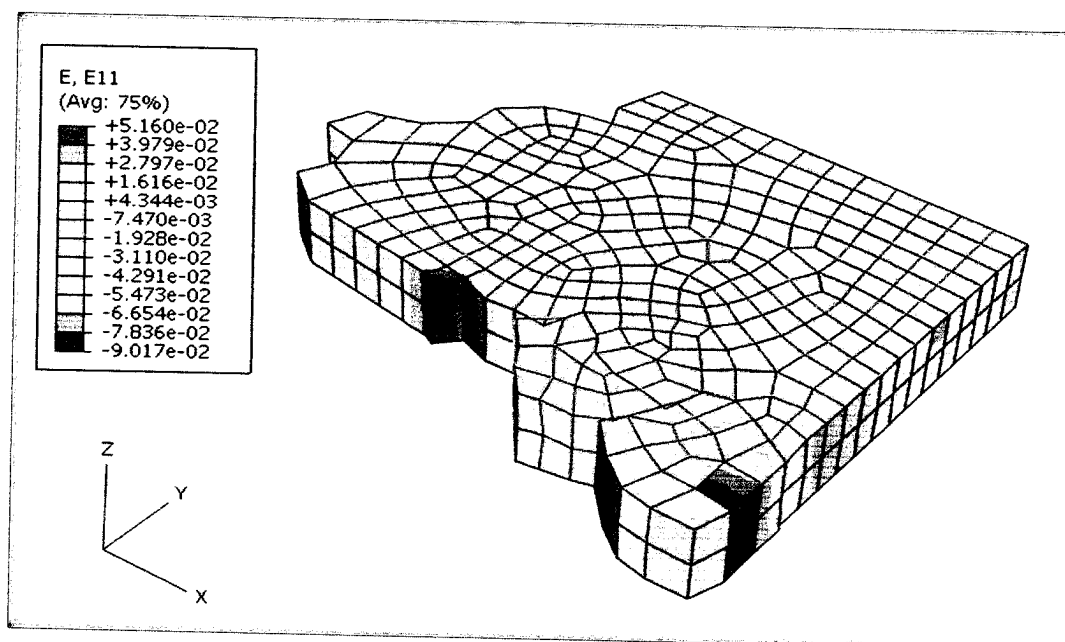


Figura IV.26. Distribución de Deformaciones E_{11} . Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior

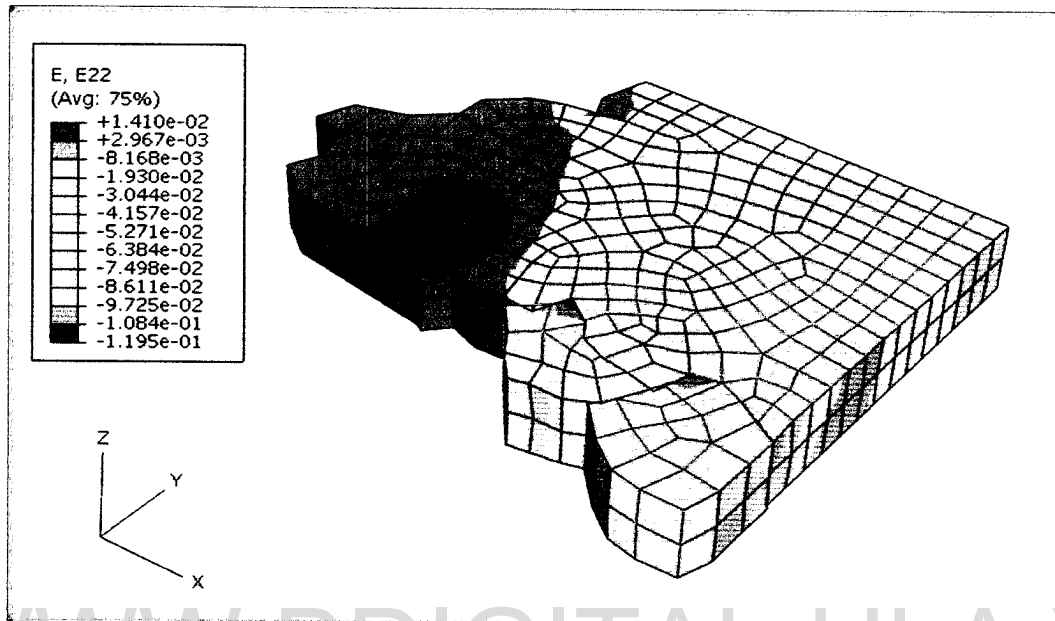


Figura IV.27. Distribución de Deformaciones E₂₂. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.

Vista Superior

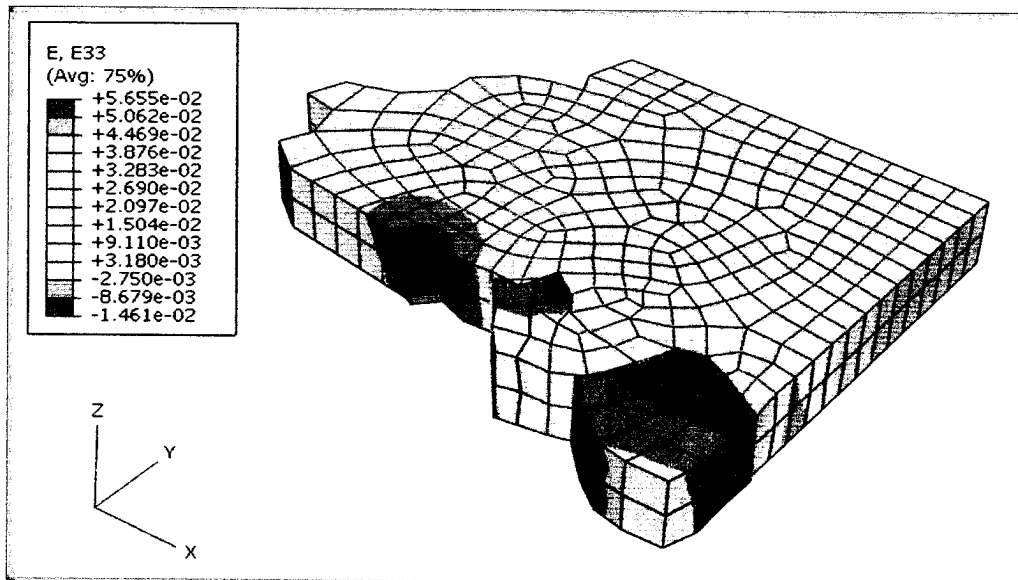


Figura IV.28. Distribución de Deformaciones E₃₃. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.

Vista Superior

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

IV.2.4 Distribución de Desplazamientos

El patrón de desplazamientos de este modelo, es más completo que el modelo anterior, ya que al integrar la placa Árabe, se tiene mayor ajuste a las condiciones que se presentan en el margen convergente de las placas en análisis.

En la figura IV.29 se nota como la distribución de desplazamientos es similar a la obtenida en el modelo anterior, alcanzando un valor máximo aproximado de 5660 metros de altura en la zona de convergencia de las placas Euroasiática e Hindú, correspondiente a la cadena montañosa del Himalaya, mientras que en la zona de convergencia de las placas Euroasiática y Árabe, alcanzó un valor aproximado de 5000 metros de altura asociado a las Montañas del Cáucaso.

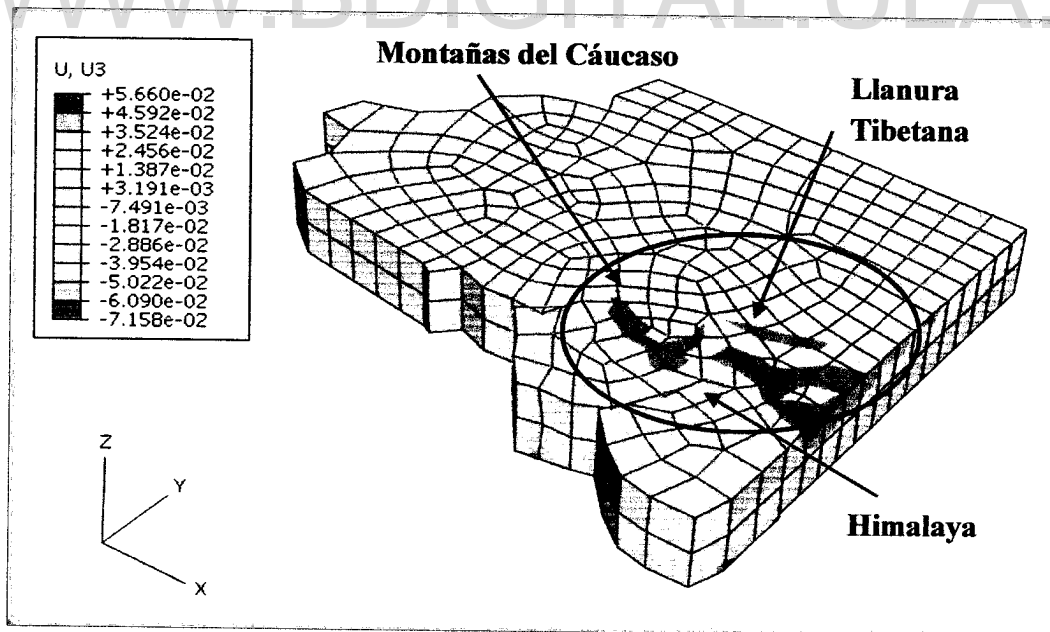


Figura IV.29. Distribución de Desplazamientos en U_3
Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. Vista Superior.

Por otra parte, en la figura IV.30 y IV.31 se observa como las placas Hindú y Árabe subducen a la placa Euroasiática, obteniendo el plano de subducción similar al reflejado en el modelo de las placas Euroasiática-Hindú.

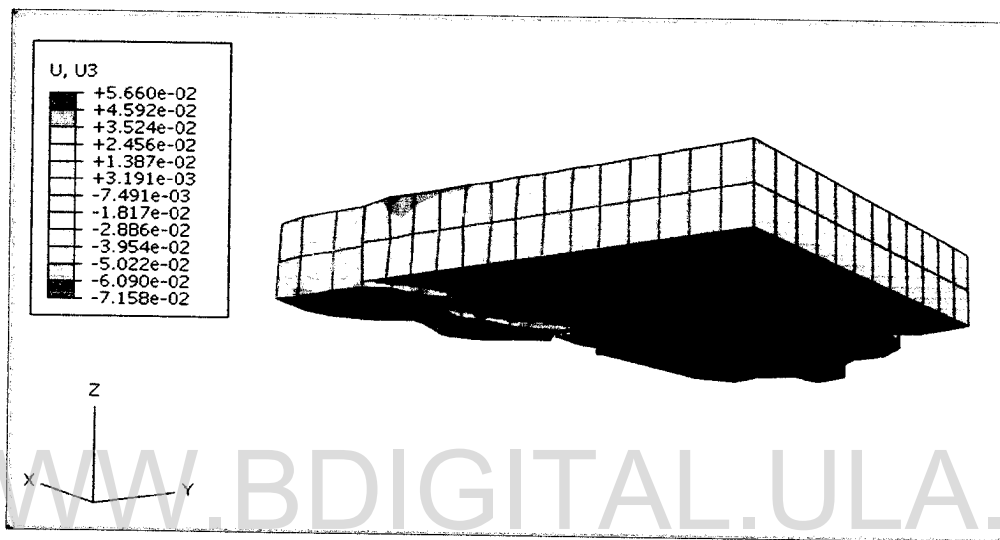


Figura IV.30. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.
Vista Inferior.

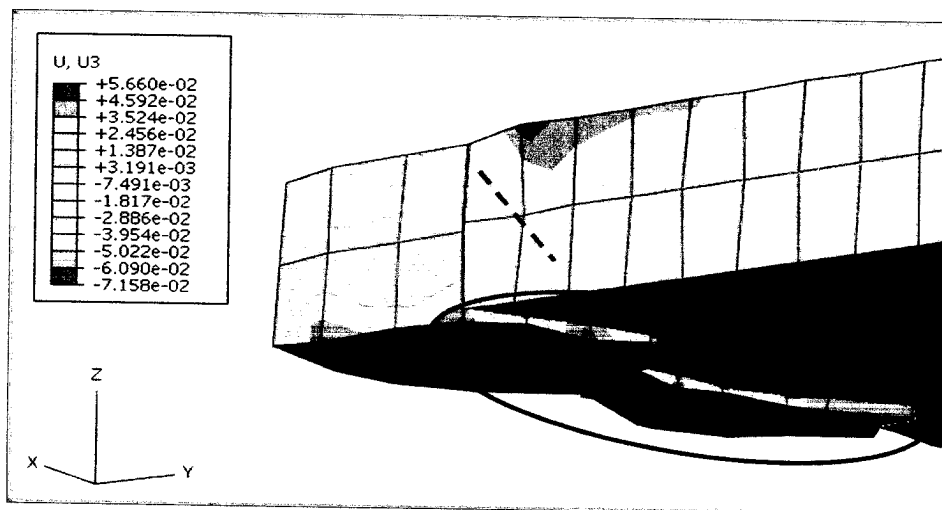


Figura IV.31. Distribución de Desplazamientos U_3 Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.
Detalle de Subducción y Plano de Subducción

IV.2.5 Calibración del Mallado y Convergencia del Modelo

Para este modelo observamos (ver tabla V.6 y figura IV.32 que la variable U_3 comienza a converger para 155 elementos (N_i), estabilizándose en 600 elementos (N_j), para el cual se obtuvo un valor de desplazamiento máximo en U_3 de 5660 metros (R_c). En este sentido, se considera que la distribución de desplazamientos en U_3 para este modelo es adecuada.

Tabla IV.6 Calibración del Mallado. Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe

Número de Elementos	Desplazamiento, U_3 , metros
77	4195
80	2804
95	4732
155	2184
354	4635
544	5660
600	5660

Donde:

R_c : resultado correcto.

N_i : número: de elementos en el cual comienza la convergencia.

N_j : número de elementos en el cual comienza la acumulación de errores.

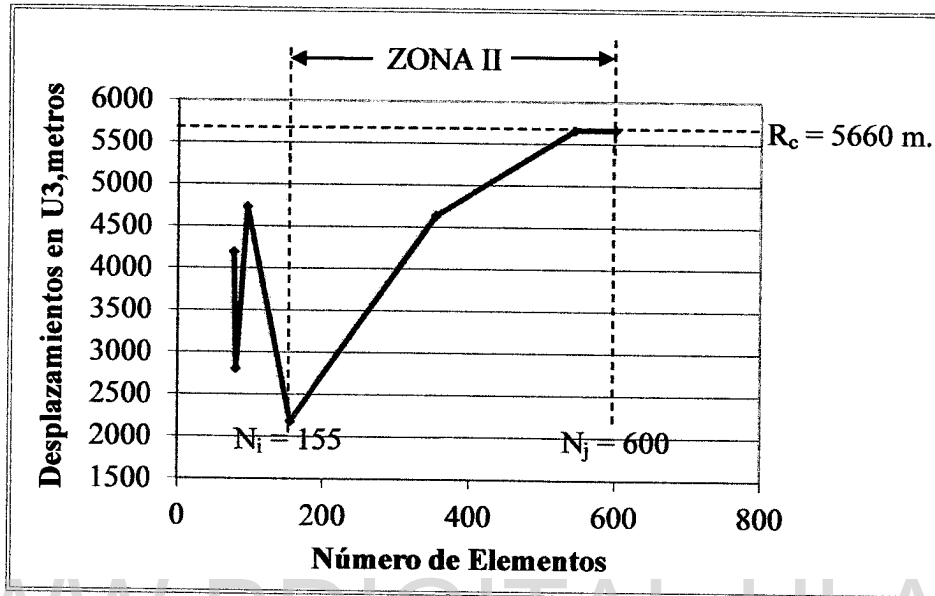


Figura IV.32. Convergencia del Modelo. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe

IV.3 Análisis Comparativo

Este análisis tiene como finalidad comparar la distribución obtenida para los desplazamientos U_3 con imágenes satelitales actuales de las placas tectónicas involucradas. Para esto es necesario observar primeramente una imagen satelital donde podamos apreciar el límite entre las placas tectónicas en estudio.

La figura IV.33 muestra la edad de la litósfera oceánica en millones de años, la cual facilita la identificación de los límites entre placas, así como también, el tipo de contacto entre éstas.

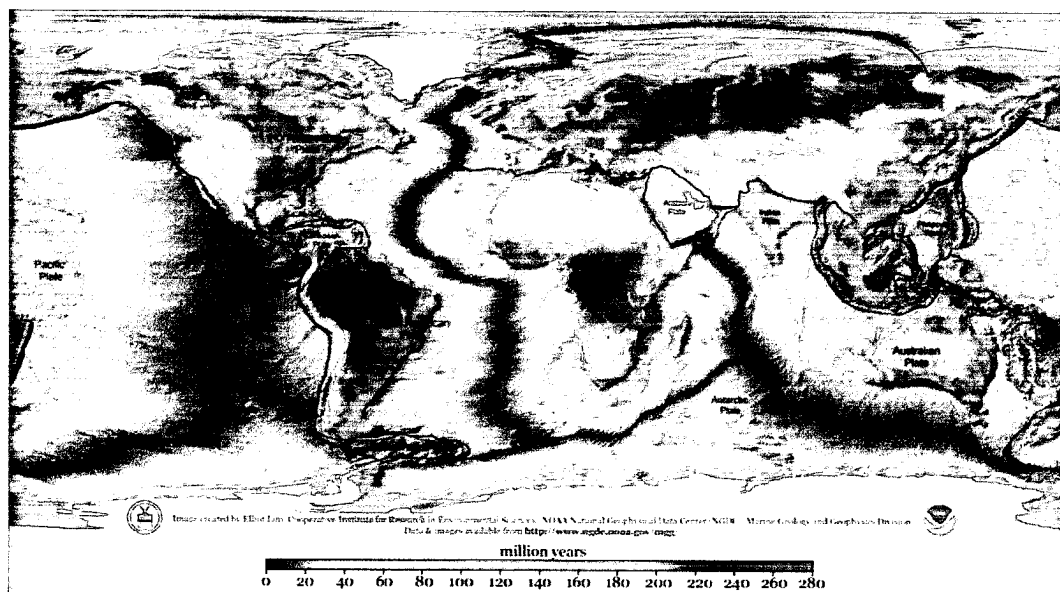


Figura IV.33. Límites entre Placas Tectónicas
(Tomado de: <http://www.ngdc.noaa.gov>)

IV.3.1 Visión General

Al comparar la imagen de batimetría y altimetría con la imagen de distribución de desplazamientos U_3 del modelo de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe se pueden destacar los siguientes aspectos:

- En primer lugar, existe una adecuada correspondencia en la distribución de desplazamientos verticales en U_3 en la zona 1-1, es decir, en el contacto entre las placas Euroasiática-Árabe, la cual corresponde a las Montañas del Cáucaso.
- En segundo lugar, la distribución de desplazamientos verticales en U_3 en la zona 2-2, producida en el contacto entre las placas Euroasiática-Hindú, muestra la distribución y extensión apropiada de la cadena montañosa del Himalaya.

- En tercer lugar, en las placas Árabe e Hindú no se observan deformaciones como las producidas en la placa Euroasiática, ya que éstas subducen a la última placa mencionada, a lo largo del plano de subducción.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

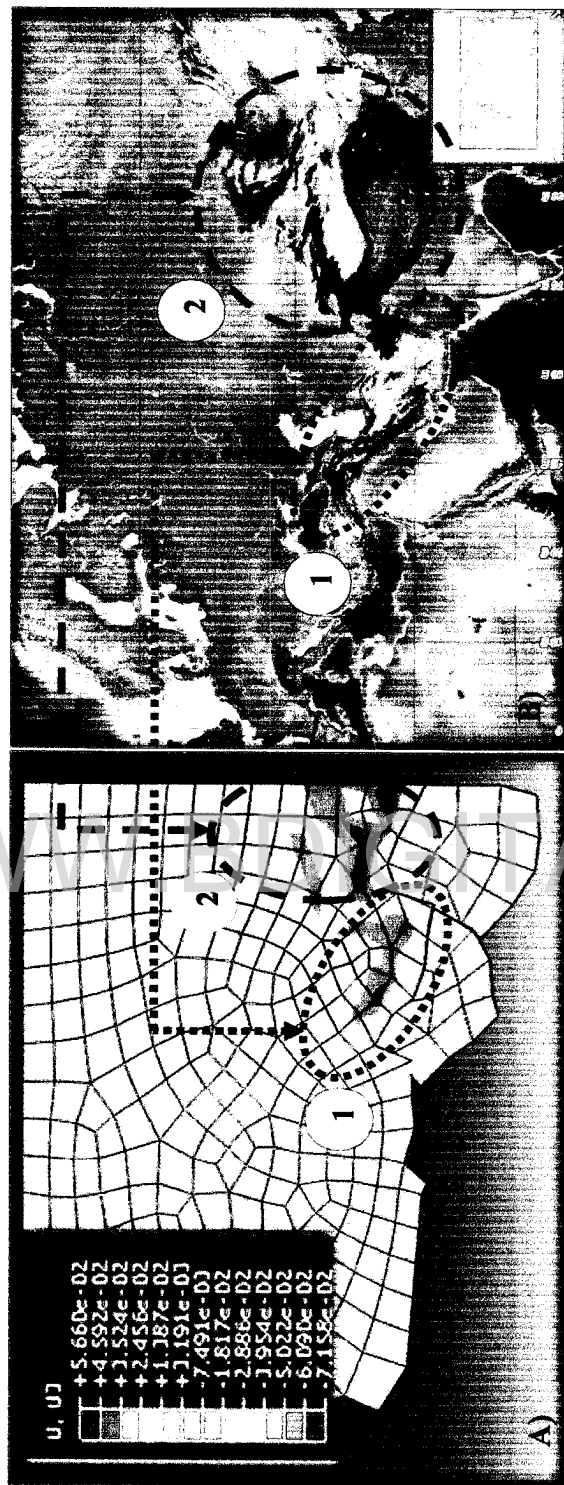


Figura IV.34. A: Distribución de Desplazamientos en U_3 , Modelo Placa Euroasiática-Hindú-Árabe. B: Imagen Satelital de Batimetría y Altimetría de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe (Tomado de: <http://www.ngdc.noaa.gov>)

IV.3.2 Visión específica de la colisión entre las placas Euroasiática-Árabe

Esta visión pretende comparar valores de altitudes obtenidas en el modelo de la placa Euroasiática-Hindú-Árabe con altitudes conocidas en el área de convergencia de las placas Euroasiática-Árabe.

En la figura IV. 35.A se puede observar que para la Sierra Dena ubicada al sur de Irán se obtuvieron altitudes cercanas a los 4000 metros, siendo este próximo a los 4100 metros de altitud que se conocen en esta cadena montañosa considerada como un mini Himalaya. A su vez, para lo que se conoce como Macizo Central de Irán compuesto varios picos importantes se alcanzaron valores de 4450 metros (Kuh-e-Hazar), 2900 metros (Kuh-e-Jain), 4150 metros (Kuh-e-Palvar) y (Kuh-e-Bazman) 3300 metros, los cuales se acercan a sus altitudes conocidas de la figura IV.35.B: 4500 metros (Kuh-e-Hazar), 2980 metros (Kuh-e-Jain), 4230 (Kuh-e-Palvar) y (Kuh-e-Bazman) 3490 metros. En la tabla IV.7 se muestra estos resultados de forma resumida.

Tabla IV.7 Valores comparativos de desplazamientos en U_3 en la zona de contacto de las placas Euroasiática-Árabe

Lugar	Valor Real	Valor obtenido en el modelo	% de aproximación
Sierra Dena	4100	4000	97,6
Kuh-e-Hazar	4500	4450	98,9
Kuh-e-Jain	2980	2900	97,3
Kuh-e-Palvar	4230	4150	98,1
Kuh-e-Bazman	3490	3400	97,4



Figura IV.35. Comparación de altitudes obtenidas en el Modelo Placa Euroasiática-Hindú-Árabe (A) con altitudes conocidas en la Imagen Satelital de Batimetría y Altimetría de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe (B) (Tomado de: <http://www.ngdc.noaa.gov>)

IV.3.3 Visión específica de la colisión entre las placas Euroasiática-Hindú

En la figura IV. 36.A se muestra los desplazamientos correspondiente a lo que se conoce como la primera fase del levantamiento de la cadena montañosa del Himalaya, por esta razón, su discusión no está enfocada en alturas de picos conocidos como en el caso anterior, esto debido a que desde el punto de vista geológico esta importante y particular cadena montañosa no es producto de un solo momento de colisión, sino que por el contrario, su formación se atribuye a dos o tres momentos diferentes, cuya velocidad de convergencia ha ido disminuyendo en el presente según lo establecido por diversos autores como Howladar y Hayashi en el 2004.

En este sentido, los resultados obtenidos para esta zona en particular reflejan de manera acertada el comportamiento inicial del contacto de estas placas, donde la placa Hindú comienza a subducir a la placa Euroasiática, originando el plano de subducción, deformaciones y altas elevaciones topográficas alcanzando alturas próximas a los 5700 metros.

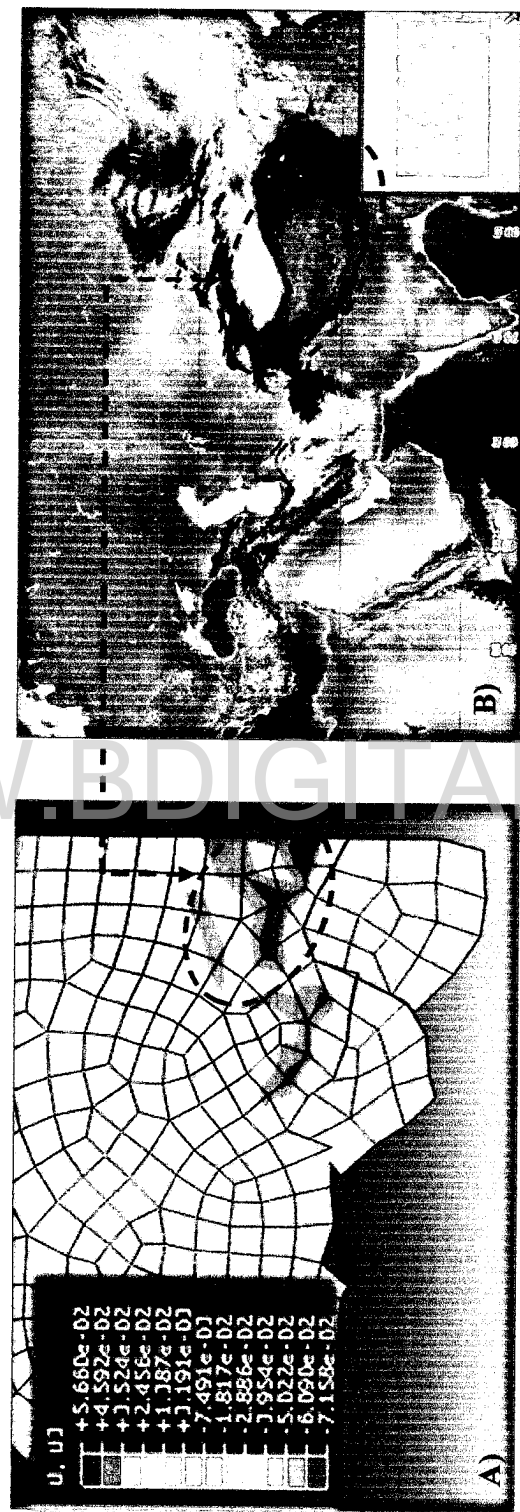


Figura IV.36. Comparación de altitudes obtenidas en el Modelo Placa Euroasiática-Hindú-Árabe (A) con altitudes conocidas en la Imagen Satelital de Batimetría y Altimetría de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe (B) (Tomado de: <http://www.ngdc.noaa.gov>)

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones derivadas del análisis numérico de la orogénesis del Himalaya:

- El uso del Método de Elementos Finitos a través de la herramienta computacional ABAQUS™, permite resolver problemas ingenieriles mediante aproximaciones numéricas, en la cual la solución manual de las ecuaciones que se derivan del análisis serían más complicadas de resolver.
- La aplicación del Método de Elementos Finitos a procesos geológicos, como los que ocurren en la colisión de placas tectónicas, permite emular y reconstruir los diferentes fenómenos que se producen durante la convergencia o divergencia entre las mismas.
- El éxito de la aproximación de un modelo numérico depende notablemente de las condiciones de borde que se establezcan durante la etapa del pre-procesamiento, por tal razón, es importante que las mismas sean fijadas de acuerdo a las condiciones del mundo “real” del fenómeno físico a estudiar.
- El valor de desplazamiento máximo en U_3 obtenido para el modelo de las placas Euroasiática-Hindú fue de 5693 metros, siendo éste cercano al valor promedio de la altura de la cadena montañosa del Himalaya, es decir, cerca de los 6000 metros.
- La distribución de desplazamientos U_3 obtenida para el choque frontal de las placas Euroasiática-Hindú, permitió observar la formación clara de lo que se denomina plano de subducción de márgenes convergentes, razón por la cual, se considera que los resultados durante la fase de simulación coinciden con la realidad geológica de la margen convergente entre estas dos placas.

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- El modelo entre las placas Euroasiática-Hindú-Árabe se adapta mejor a las condiciones geológicas de la zona en análisis, obteniéndose una distribución más completa de los desplazamientos en U_3 , registrándose un valor máximo de 5660 metros en el área de colisión de las placas Euroasiática-Hindú y de 5000 metros en el área de colisión de las placas Euroasiática-Árabe.
- La calibración y convergencia del modelo de las placas Euroasiática-Hindú se logró para un total de 576 elementos, en el cual la variable geonumérica considerada se estabilizó, alcanzando un valor máximo de desplazamiento U_3 igual a 5693 metros, mientras que para el modelo de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe, el valor de desplazamiento U_3 se estabilizó en 5660 metros.
- Para ambos modelos estudiados, la distribución de esfuerzos registraron valores máximos en la zona de contacto de las placas Árabe e Hindú con la placa Euroasiática, siendo este tipo de esfuerzo compresivo debido a la característica típica de este de tipo de borde convergente en placas tectónicas.
- El análisis comparativo entre la imagen satelital actualizada de las placas involucradas en el análisis y la distribución de desplazamientos U_3 obtenida en el modelo de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe permite confirmar que los valores obtenidos durante simulación de la orogénesis del Himalaya es acertada.
- La comparación entre la imagen de batimetría y la distribución de desplazamientos en U_3 obtenida en la simulación del modelo de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe en el área de contacto de las placas Euroasiática-Árabe arrojan valores de altitudes bastante próximos a valores reales de picos conocidos como la sierra Dena, Kuh-e-Hazar, Kuh-e-Jain, (Kuh-e-Palvar) y Kuh-e-Bazman.
- La comparación entre la imagen de batimetría y la distribución de desplazamientos en U_3 obtenida en la simulación del modelo de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe en el área de contacto de las placas Euroasiática-

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Hindú reflejan que dichas altitudes corresponden al primero momento, de dos o tres según diversos autores, del levantamiento de la cadena montañosa más alta de nuestro planeta, El Himalaya.

- Para los modelos de las placas Euroasiática-Hindú y Euroasiática-Hindú-Árabe, los esfuerzos máximos compresivos principales se producen en la dirección S_{22} , los esfuerzos medios principales en la dirección S_{11} y los mínimos principales en la dirección S_{33} .

V.2 Recomendaciones

- Realizar un modelo numérico tridimensional que considere la variable temperatura en los modelos de las placas Euroasiática-Hindú y Euroasiática-Hindú-Árabe, y de esta manera, emular la fusión parcial que ocurre en la corteza durante el proceso de subducción observado en ambos modelos.
- Realizar un modelo numérico tridimensional que integre al modelo de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe la placa Africana para complementar el mismo y simular la dorsal oceánica que dio origen al mar rojo.
- Realizar un modelo numérico tridimensional de las placas Euroasiática-Hindú y Euroasiática-Hindú-Árabe, que involucren los dos momentos geológicos posteriores al momento inicial considerado en ésta investigación, y de esta forma, obtener las altitudes actuales de la cadena montañosa del Himalaya.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabello, D. Navarrete, M. y Elberg, M. 2005. Simulación Geomecánica de la Falla la Hechicera. Trabajo Final de Grado No Publicado. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida.
- Debelmes, J.; Mascle, G. y Bacile C. 2008. “Les Grandes Structures Géologiques”. 5ta Edición. Paris Francia.
- Dyksterhuis, S.; Albert, R.A. y Muller, R.D. 2005. Finite element modelling of contemporary and paleo-intraplate stress using ABAQUSTM. Computers and Goesciences.31:297-307.
- Elberg, M. y Febres, G. 2004. Proceso automatizado de refinamiento H-adaptativo usando índices de energía de deformación. Ciencia e Ingeniería. 25 (3):143-148.
- Elberg, M.; Quintero, J.; González.; L. y Bongiorno, F. (2006). Estudio del comportamiento del Túnel de Estanques de la Autopista Rafael Caldera y del Corrimiento de Mesa Bolívar con Base a Simulación Geomecánica por el Método de Elementos Finitos. Capítulo MS-65.
- Elberg, M. y Sosa, G. 2008. Estudio de la energía de deformación entre las placas Suramericanas, Nazca y Caribe con la aplicación del Método de Elementos Finitos. “Desarrollo y avances en Métodos Numéricos para Ingeniería y Ciencias Aplicadas”. Capítulo MS-61.
- Elberg, M.; Fernández, V.; Vivas, J.; Sosa, G. y González, L. 2011. Análisis Numérico de las discontinuidades del macizo rocoso de la autopista Rafael Caldera en Venezuela. Ciencia e Ingeniería. 32 (2):67-72.
- Elberg, M. y Ogaya, N. 2012. Análisis Numérico de la Interacción Presa-Talud del Complejo Hidroeléctrico José Antonio Páez. “Avances en Simulación Computacional y Modelado Numérico”. Capítulo GG.41.

- García, J. 2007. Geometría, Sismicidad y Deformación de la Placa Cosos Subducida. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Maestría en Ciencias de la Tierra. México.
- González de Vallejo, L. Ortuño, L. Ferrer, M. y Oteo, C. 2004. "Ingeniería Geológica". Pearson Educación. Madrid. España
- Gutiérrez, J. y Monsalve, M. 2010. Análisis de Estabilidad a *posteriori* del Deslizamiento Las González, Municipio Sucre, Estado Mérida-Venezuela, aplicando el Método de Elementos Finitos. Geominas: 38 (53): 141-146.
- Gutiérrez, J. Torres, J y Elberg, M. 2010. Uso de Elementos Finitos en el Análisis Numérico de la Formación del Himalaya por el contacto entre las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe. "Métodos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones". Capítulo GG.43.
- Gutiérrez, J y Elberg, M. 2012. Análisis Numérico de la Orogénesis del Himalaya. "Avances en Simulación Computacional y Modelado Numérico". Capítulo GG.15.
- Howladar, M. y Hayashi, D. 2004. Simulation of Himalayan Mayor Thrusts by Finite Element Method. Geoinformatics. 15 (4): 207-219.
- Logan, L. 1993. "A First Course in the Finite Element Method". Publishing Company. Estados Unidos de América.
- Monsalve *et al*, 2009. Mantle fault zones beneath the Himalayan collision: Flexure of continental lithosphere. Tectonophysics. 477:66-76.
- Pande G y Beer G, 1990. "Numerical Methods in Rock Mechanics". Jhon Wiley & Sons, Inc. England.
- Sosa, G.; Alam, M. y Elberg, M. 2008. Aplicación del Método de Elementos Finitos en la simulación de zonas susceptibles a movimientos de masa en la franja costera del Estado Carabobo, Venezuela. Revista Ciencia e Ingeniería. 29 (2):199-206.

- Tarbuck, E. y Lutgens. 1999. "Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física". Madrid, España.
- Torres, J. Gutiérrez, J. y Elberg, M. 2010. Simulación Numérica de los Límites entre las placas Euroasiática, Australiana y Filipina empleando el Método de Elementos Finitos. "Métodos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones". Capítulo GG.49.
- Turcotte, D. y Schubert, G. 1982. "Geodynamics". Applications of Continuum Physics to geological problems. John Wiley & Sons. United States of America.

Enlaces Consultados

- http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Placas_tectonicas_mapa.png
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Himalaya>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Placa_Índica
- http://es.wikipedia.org/wiki/Placa_Euroasiática
- <http://j-g-sansegundo.over-blog.es/7-index.html>,
- <http://pubs.usgs.gov/imap/2800/TDPfront.pdf>
- <http://tectonics.rice.edu/hs3.html>
- <http://www.ngdc.noaa.gov>
- <http://www.drgeorgepc.com/Earthquake2001India.html>
- http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales/abaqus/introduccion_abaqus.pdf
- http://laestructuradelatierayloscambiongeolo.blogspot.com/2010_09_01_archi
ve.html
- <http://biogeo1bxramonlull.files.wordpress.com/2012/04/orogenesis.pdf>
- <http://spanish.china.org.cn/spanish/190106.htm>

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- <http://www.geographos.com/mapas/?p=51>
- http://193.147.167.77/images/0/0a/Mapamundi_gran.jpg

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

APÉNDICES

Publicaciones

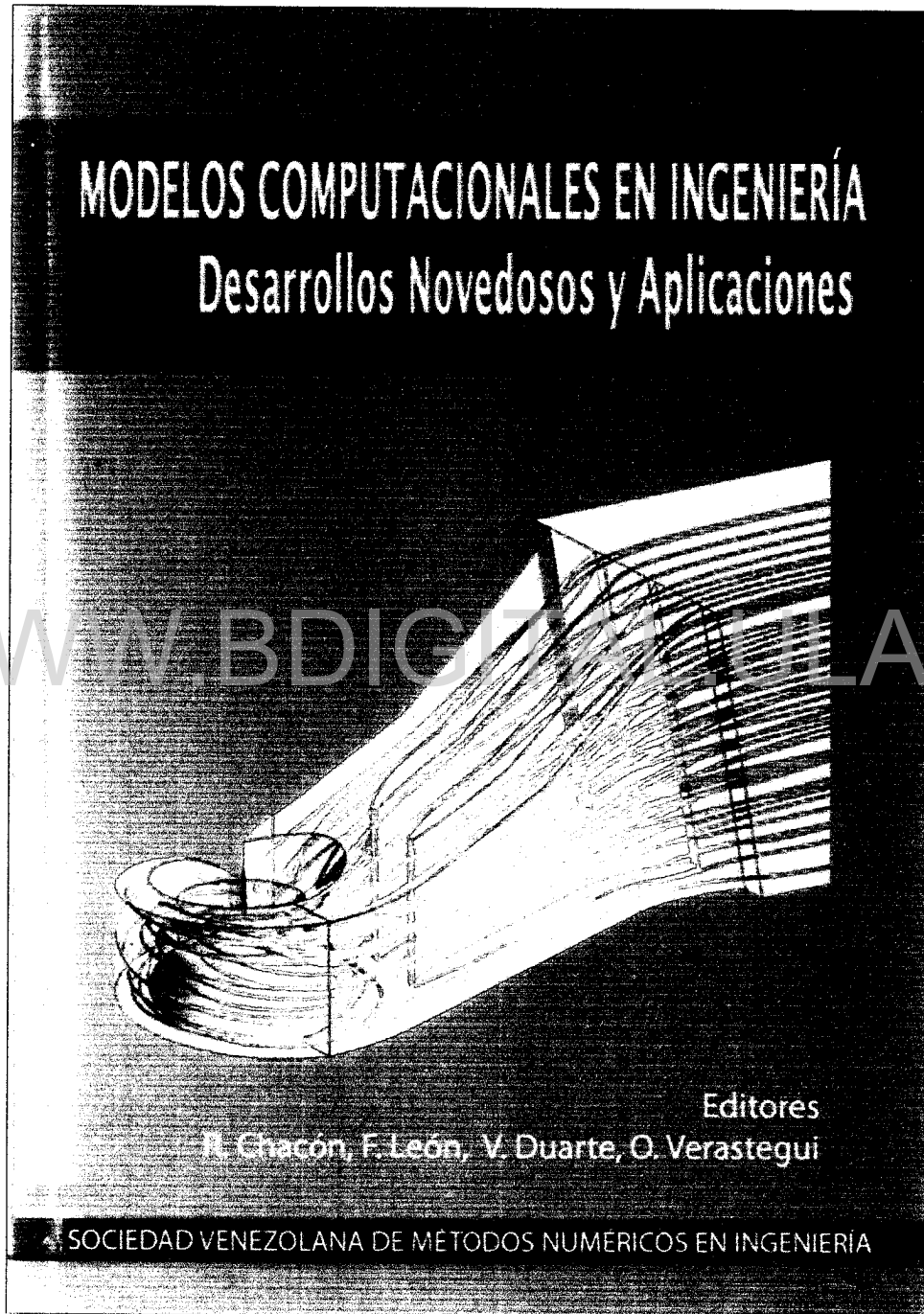
- Uso del Método de Elementos Finitos en el análisis numérico de la formación del Himalaya por el contacto entre las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe.
- Análisis Numérico de la Orogénesis del Himalaya.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



Modelos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones
R. Chacón, F. León, V. Duarte, O. Verastegui (Editores) © 2010 SVMNI
Todos los derechos reservados

USO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA FORMACIÓN DEL HIMALAYA POR EL CONTACTO ENTRE LAS PLACAS TECTÓNICAS EUROASIÁTICA, HINDÚ Y ÁRABE

José Gutiérrez-Chacón

jose.gutierrez@ula.ve

Postgrado de Matemática Aplicada a la Ingeniería. Facultad de Ingeniería.

Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela

Jesús Torres-Hoyer

Maria Elisa Elberg

j.torres@ula.ve

mariael@ula.ve

Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica.

Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez, Edificio de Ingeniería, Ala Oeste, Nivel II. Mérida, Venezuela.

Resumen. Esta investigación tiene como objetivo principal realizar el análisis del estado esfuerzo-deformación en el contacto entre las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe, mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos, a través del paquete computacional ABAQUS. La metodología utilizada se basa en una investigación preliminar de toda la información bibliográfica necesaria para construir los modelos numéricos tridimensionales de las placas tectónicas en estudio, empleando para ello modelos de calibración que permiten optimizar y mantener las condiciones reales del medio. Los resultados obtenidos muestran una distribución de desplazamientos verticales correspondientes a valores promedio de las alturas de la cadena montañosa de los Himalayas, las cuales fueron producto del levantamiento debido a la convergencia entre las placas Hindú y Árabe con la placa Euroasiática. También se obtiene la formación del plano de subducción característico de la zona en todos los modelos estudiados. El modelado numérico realizado en este estudio reproduce el comportamiento geológico del margen convergente de las placas involucradas, permitiendo reconstruir la formación de esta importante cadena montañosa y la determinación cuantitativa de valores de esfuerzo y deformación que le dieron origen.

Palabras Claves: placas tectónicas, método de elementos finitos, simulación, Himalayas

GG-44 Modelos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones

1. INTRODUCCIÓN.

Las placas se mueven como unidades coherentes en relación con las otras placas. Aunque el interior de las placas puede deformarse, las principales interacciones entre las placas individuales se producen a lo largo de sus bordes. Dichos bordes, pueden ser: convergentes, divergentes y de falla transformantes. Cada placa está rodeada por una combinación de estas zonas, como es el caso de las placas Euroasiática, Hindú y Árabe.

Por esta razón, se aplica el Método de Elementos Finitos (MEF) para estudiar la interacción entre el margen convergente de las placas Hindú y Árabe con la placa Euroasiática, y de esta manera, analizar los fenómenos geológicos que dieron origen a la formación del Himalaya.

2. OBJETIVOS.

2.1 Objetivo General.

Analizar el estado de esfuerzo-deformación en el contacto entre las placas tectónicas Euroasiática, Hindu y Árabe, mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos.

2.2 Objetivos Específicos.

- Realizar el modelo numérico 3D de la convergencia entre las placas tectónicas Euroasiática e Hindú.
- Analizar el modelado numérico completo en 3D del contacto entre las placas Euroasiática, Hindu y Árabe para analizar el levantamiento del Himalaya.

3. UBICACIÓN

Las placas Euroasiática, Hindú y Árabe, se encuentran en contacto hacia la parte nororiental del planeta (ver figura 1).



Figura 1. Ubicación del Área de Estudio. A: Margen Convergente Árabe-Euroasiática. B: Margen Convergente Hindú-Euroasiática.

(modificada de: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Placas_tectonicas_mapa.png).

4. METODOLOGÍA.

4.1 Análisis Documental.

Esta etapa corresponde a la recopilación de toda la información necesaria de la zona de estudio, dado que es extensa y compleja en términos geológicos, obteniendo principalmente la geometría de las placas tectónicas y las propiedades de los materiales constitutivos.

4.2 Análisis Numérico y generalidades de los modelos 3D.

La realización de esta etapa permite determinar el comportamiento de las placas tectónicas en estudio mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos. Este análisis consiste en la creación de la geometría de las placas, propiedades de los materiales, condiciones de borde, cargas aplicadas y mallado de las mismas, todo esto con el programa computacional ABAQUS™.

La geometría mostrada en la figura 2, es obtenida utilizando la información satelital y estudios recientes realizados por Elberg y Sosa en el 2007.



Figura 2. Geometría 3D de Placas: A) Euroasiática, B) Hindú.

Las condiciones de borde (CB) se obtienen con diversas pruebas verificando los empujes de las placas en fuerza de volumen y presiones (CA) obteniendo espacios geológicos conocidos en límites naturales actuales, como alturas promedios del Himalaya. Son asignadas para mantener la continuidad las cuales se muestran en la figura 3A. El mallado mostrado en la figura 3B, utiliza elementos tridimensionales de 8 nodos e integración reducida.

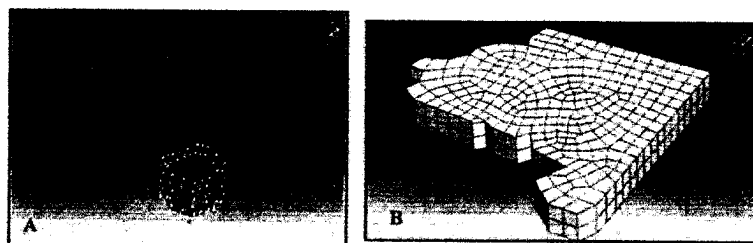


Figura 3. Placas Euroasiática-Hindú. A) Ensamblaje, CB y CA. B) Mallado

GG-46 Modelos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones

Para iniciar el análisis, se seleccionan los márgenes convergentes entre las placas Euroasiática-Hindu, Euroasiática-Árabe y Euroasiática-Hindu-Árabe. Estos márgenes, se construyen como modelos tridimensionales, representando la vista en planta de las placas en el plano XY y extruidos unitariamente en el plano Z. Por otra parte, los modelos se consideran compuestos sólo por litósfera.

Por otra parte, los modelos se consideran compuestos sólo por litósfera. La tabla siguiente muestra los valores geomecánicos utilizados.

Tabla 1. Propiedades de la Litósfera. Tomado de Turcotte (1988)

Densidad (γ) kg/km ³	Modulo de Elasticidad (E) N/km ²	Coefficiente de Poisson (ν)
3.36E12	1.62E17	0.28

El modelo completo 3D se muestra en la figura 4 donde se señala la geometría, las condiciones de borde y el mallado del modelo por las tres placas.

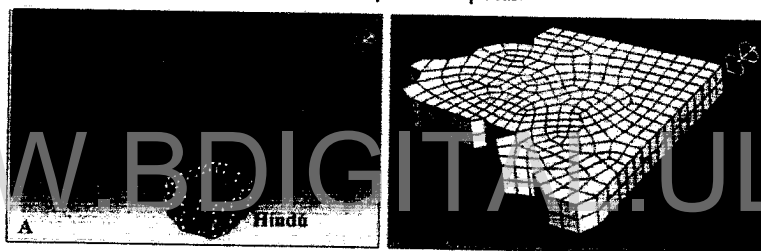


Figura 4. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. A) Geometría, CB y CA. B) Mallado

5. RESULTADOS.

Los resultados se basan en la cuantificación de valores característicos del levantamiento del Himalaya con base a valores de estados naturales conocidos.

La distribución de desplazamientos verticales positivos obtenidos entre placas Euroasiática-Hindú son muy próximos, 5500 metros, a la distribución de desplazamientos reales que se encuentran en la cadena montañosa de los Himalayas, en donde la altura promedio es de 6000 metros de altura como se muestra en la figura 5.

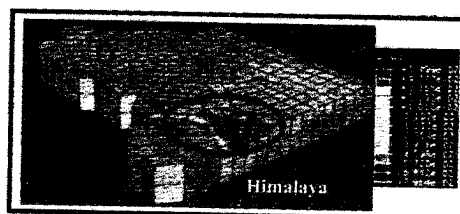


Figura 5. Desplazamientos en Km, Positivos en el eje Z (U_3). Vista Superior 3D.

Por otra parte, en la figura 6, se muestra como se forma la subducción y plano de la misma, coincidiendo con la realidad en cuanto al margen convergente que existe entre estas dos placas, lo cual, dio origen a la formación ó levantamiento de la cadena montañosa de los Himalayas.

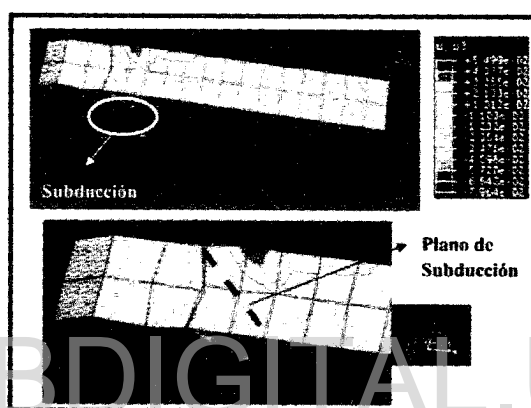


Figura 6. Desplazamientos Negativos, en Km, en el eje Z (U_3). Detalle 3D del plano de subducción entre las placas Euroasiática-Hindú.

Los resultados obtenidos muestran que los desplazamientos se mantienen al incluir la placa Árabe, zona en la cual se alcanzan alturas cercanos a los 3500 metros. Por otra parte se nota, al igual que en la convergencia de la placa Euroasiática-Hindu, la formación de la margen convergente que se produce en el contacto de estas tres placas tectónicas, distribución que coincide con la realidad geológica de las mismas como se aprecia en la figura 7.

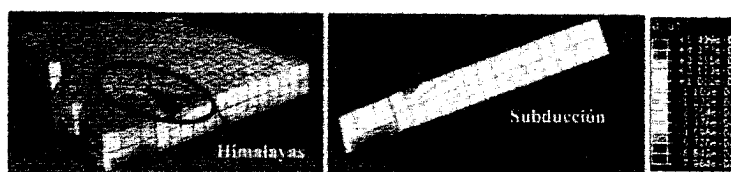


Figura 7. Placas Euroasiática-Hindú-Arabe. Distribución de Desplazamientos en Km en U_3

GG-48 Modelos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones

La tabla 2, muestra de manera resumida los resultados obtenidos en esta investigación.

Tabla 2. Valores de Desplazamientos en Km en la dirección U_3 .

Placas Tectónicas consideradas en la simulación.	Altura en metros de la Margen Convergente Euroasiática-Hindú.	Altura en metros de la Margen Convergente Euroasiática-Árabe.
Euroasiática e Hindú	5500	-----
Euroasiática, Hindú y Árabe	5500	3500

6. CONCLUSIONES.

La aplicación del Método de Elementos Finitos a través del paquete computacional ABAQUS, permite resolver un sinnúmero de problemas ingenieriles mediante aproximaciones numéricas, en la cual la solución manual de las ecuaciones que se derivan del análisis serían más complicadas de resolver.

Los valores de desplazamientos verticales obtenidos en la simulación del contacto entre las placas Euroasiática-Hindú fue de 5500 metros, siendo éste un valor cercano al valor promedio de la altura de la cadena montañosa de los Himalayas.

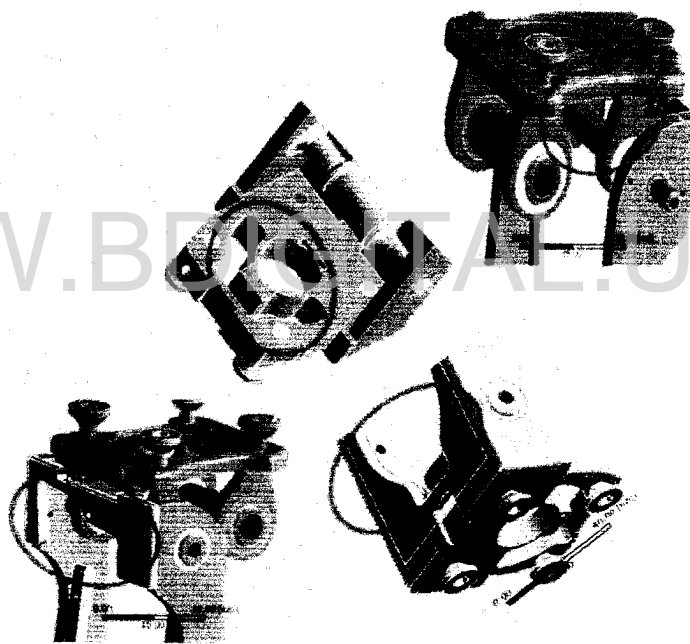
La distribución de desplazamientos obtenida del choque frontal de las placas Euroasiática-Hindú, permitió observar la formación clara de lo que se denomina plano de subducción de márgenes convergentes, razón por la cual, se considera que los resultados durante la fase de simulación coinciden con la realidad geológica de la margen convergente entre estas dos placas.

Por otra parte, al considerar la simulación de las tres placas (Euroasiática-Hindú-Árabe), se obtienen los mismos valores de desplazamientos en el contacto de la placa Euroasiática-Hindú, pero aparece los valores de desplazamientos cercanos a los 3500 metros en el contacto entre las placas Euroasiática-Árabe, complementando y mejorando la distribución de la cadena montañosa de los Himalayas a lo largo de este cinturón convergente.

7. REFERENCIAS.

- Chandrupatla, T y Belegundo, A. D. (1999). *Introduction to Finite Elements in Engineering* (2da ed.). Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Dyksterhuis, S. Albert, R.A. y Muller, R.D. (2005). *Finite element modelling of contemporary and paleo-intraplate stress using ABAQUS™*. Computers and Geosciences. 31:297-307.
- Elberg, M. y Sosa, G. (2007). *Estudio de la energía de deformación entre las placas Suramericanas, Nazca y Caribe con la aplicación del Método de Elementos Finitos*. Ponencia presentada en las VI Jornadas Científico Técnicas de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Gutiérrez J. (2009). *Análisis de Estabilidad del Deslizamiento Las González, Municipio Sucre, Estado Mérida*. Mérida, Venezuela.
- Logan L. (1993). *A First Course in the Finite Element Method*. Publishing Company. Estados Unidos de América.
- Tarbut, E y Lutgens (1999). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid, España, pp. 437.

AVANCES EN SIMULACION COMPUTACIONAL Y MODELADO NUMERICO



Editores

E. Dávila, G. Uzcátegui, M. Cerrolaza

SOCIEDAD VENEZOLANA DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA

Licencia Creative Commons:

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA (GUTIÉRREZ, J.)

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA OROGÉNESIS DEL HIMALAYA

• José Gutiérrez

jose.gutierrez@ula.ve

Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela Básica de Ingeniería.

Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez, Edificio de Ingeniería, Ala Norte, Nivel II. Mérida, Venezuela.

Maria Elberg

mariael@ula.ve

Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica.

Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez, Edificio de Ingeniería, Ala Oeste, Nivel II. Mérida, Venezuela.

Resumen. Esta investigación de tipo aplicado, tiene como objetivo principal analizar numéricamente la orogénesis del Himalaya, aplicando el Método de Elementos Finitos a través del paquete computacional ABAQUSTM [1]. La metodología utilizada se basa inicialmente en la indagación de tópicos conexos a la investigación, seguido por la etapa de análisis numérico que incluye los datos de entrada del modelo como lo son: geometría, propiedades de los materiales, condiciones de borde, cargas actuantes y mallado. La geometría de las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe se obtiene a través de imágenes satelitales, siendo éstas fundamentales para la creación del modelo, el cual se considera hasta 100 kilómetros de profundidad, compuesto por litósfera, cuyas cargas actuantes y condiciones de borde se establecen en función de las características geológicas del borde convergente existente entre las placas Euroasiática-Hindú y Euroasiática-Árabe. La gráfica de convergencia del modelo y calibración del mallado, muestra que el valor obtenido para la variable geométrica U_3 es apropiado, lográndose su convergencia para 600 elementos. Por otra parte, en la distribución de desplazamientos U_3 , se observa que el valor máximo alcanzado fue de 5660 metros, siendo éste cercano a los valores promedios de la altura de la cadena montañosa del Himalaya (6000 metros). Esta distribución y cuantificación de desplazamientos en U_3 , junto con el análisis comparativo, permiten emular el origen de la cadena montañosa más imponente de nuestro planeta, el Himalaya.

Palabras Claves: Calibración, Convergencia, Método de Elementos Finitos, Simulación, Himalaya.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos numéricos constituyen actualmente una herramienta poderosa en la solución de problemas de ingeniería, ya que permite realizar entre sus tantos usos, análisis de estado de esfuerzo-deformación, a través del Método de Elementos Finitos (MEF).

Este trabajo de investigación de tipo aplicado, está motivado en realizar una caracterización tectónica del contacto entre las placas Euroasiática, Hindú y Árabe, a través de simulaciones numéricas empleando el MEF, y de ésta manera, observar la evolución geológica del levantamiento de la cadena montañosa del Himalaya.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Analizar el sistema de margen convergente durante el proceso de formación de la cadena montañosa del Himalaya mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos.

2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar la información bibliográfica y estudios preliminares.
- Acoplar las condiciones geológicas del medio a los modelos numéricos con sus respectivas geometrías y condiciones de borde que garanticen la realidad geológica del área en análisis.
- Realizar el modelo numérico 3D del contacto entre las placas Euroasiática-Hindú-Árabe.
- Analizar la convergencia de las variables geonuméricas.

3. UBICACIÓN

Los Himalayas se encuentran ubicados hacia la parte nororiental del planeta, cuya formación es el resultado de la interacción entre las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe mostradas en la figura 1.



Figura 1. Ubicación de las Placas Tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe [2].

4. METODOLOGÍA

4.1 Estudios Preliminares

La indagación de tópicos conexos a la investigación, se inicia con lecturas que van desde las primeras ideas plateadas durante la teoría de la tectónica de placas hasta las nuevas tendencias, las cuales, están siendo consideradas como explicativas del movimiento y transformaciones a las que las placas tectónicas han estado sometidas, desde la creación de nuestro planeta a la actualidad. Adicionalmente, se debe adoptar la búsqueda de temas en los que se ha aplicado el Método de Elementos Finitos (MEF) a problemas de índole geológico, mediante herramientas computacionales como ABAQUSTM.

4.2 Análisis Numérico

Para iniciar el análisis se seleccionan las placas tectónicas involucradas, Euroasiática, Hindú y Árabe, y se determina en función de su comportamiento geológico actual, el tipo de margen existente, así como también, las propiedades geomecánicas de las capas composicionales de los modelos.

En este sentido, se establece que el comportamiento geológico del modelo compuesto por las placas Euroasiática, Hindú y Árabe es de tipo convergente. El modelo se considera hasta una profundidad de 100 kilómetros, es decir, compuesto por litósfera, cuyas propiedades se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de la Litósfera [3]

Densidad (γ) kg/km ³	Modulo de Elasticidad (E) N/km ²	Coefficiente de Poisson (ν)
3.36E12	1.62E17	0.28

Una vez definida las características generales del modelo, se elabora la geometría de cada una de las placas tectónicas que conforman el mismo (ver figura 2), utilizando como punto de partida sus imágenes satelitales [4].

Posteriormente, se establecen las condiciones de borde (CB) y cargas aplicadas (CA) al modelo, las cuales son el producto de diversas pruebas verificando los empujes de las placas en fuerza de volumen y presiones obteniendo espacios geológicos conocidos en límites naturales actuales, como alturas promedios del Himalaya.

Finalmente, se realiza el mallado compuesto por elementos C3D8R perteneciente a la librería de ABAQUSTM, es decir, elementos tridimensionales, hexaédrico, de 8 nodos, con interpolación lineal e integración reducida.

5. RESULTADOS

A continuación se ilustran los resultados de distribución de desplazamientos verticales (U_3), así como también, la calibración del mallado y convergencia para el modelo de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe, los cuales se llevaron a cabo mediante el uso de la herramienta computacional ABAQUSTM a través de la licencia del servidor del Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes (CeCalCULA).

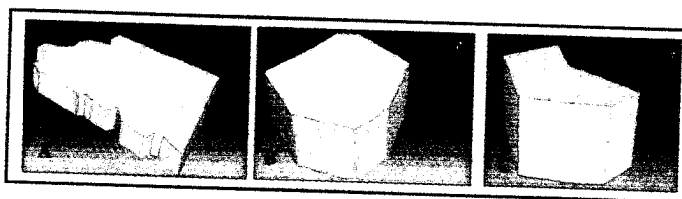


Figura 2. Geometría 3D de las Placas: A) Euroasiática, B) Hindú, C) Árabe.

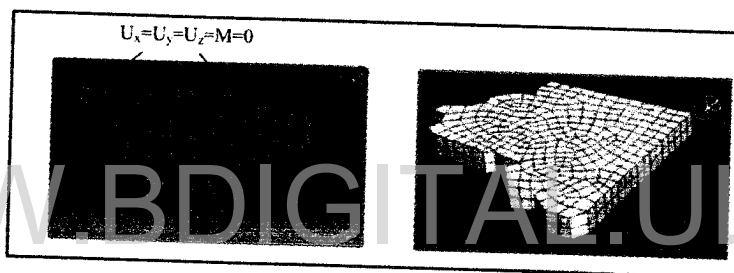


Figura 3. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe. A) Geometría, CB y CA. B) Mallado

5. RESULTADOS

A continuación se ilustran los resultados de distribución de desplazamientos verticales (U_3), así como también, la calibración del mallado y convergencia para el modelo de las placas Euroasiática-Hindú-Árabe, los cuales se llevaron a cabo mediante el uso de la herramienta computacional ABAQUSTM a través de la licencia del servidor del Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes (CeCalCULA).

5.1 Calibración del Mallado y Convergencia del Modelo

En la figura 4, notamos como la variable U_3 comienza a converger para 155 elementos (N_1), estabilizándose en 600 elementos (N_2), para el cual se obtuvo un valor de desplazamiento máximo en U_3 de 5660 metros (R_c). Por tal razón, se considera que la distribución de desplazamientos en U_3 es apropiada.

5.2 Distribución de Desplazamientos

En la figura 5, se muestra el patrón de desplazamientos en U_3 , alcanzándose un valor máximo aproximado de 5560 metros de altura en la zona de contacto de las placas Euroasiática e Hindú, correspondiente a la cadena montañosa del Himalaya, mientras que en la zona de

convergencia de las placas Euroasiática y Árabe, alcanzó un valor aproximado de 5000 metros de altura asociado a las Montañas del Cáucaso.

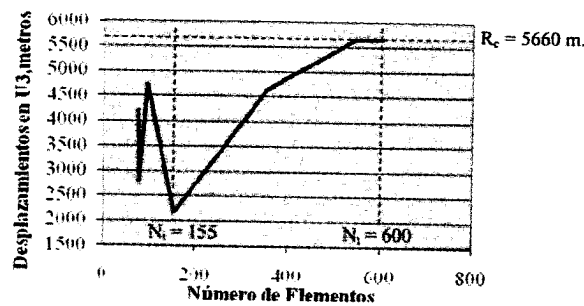


Figura 4. Convergencia del Modelo. Placas Euroasiática-Hindú-Árabe.

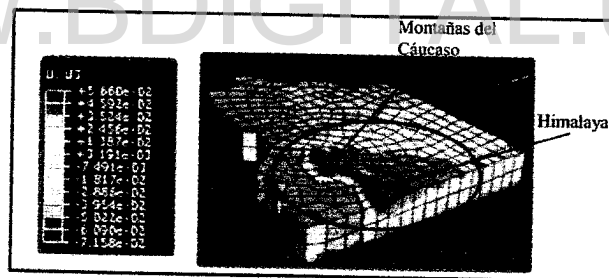


Figura 5. Distribución de Desplazamientos U_3 (m). Modelo Placas Euroasiática-Hindú-Árabe

5.3 Análisis Comparativo

Este análisis tiene como finalidad comparar la distribución obtenida para los desplazamientos U_3 con imágenes satelitales actuales de las placas tectónicas involucradas. En la figura 6 podemos notar que hay:

- Correspondencia en la distribución de desplazamientos verticales en U_3 en la zona 1-1, es decir, en el contacto entre las placas Euroasiática-Árabe, la cual corresponde a las Montañas del Cáucaso.
- Adecuada distribución de desplazamientos verticales en U_3 en la zona 2-2, producida en el contacto entre las placas Euroasiática-Hindú, cuya altimetría corresponde a la cadena montañosa del Himalaya.