

Análisis numérico del levantamiento de Los Andes en Sudamérica con base a energía de deformación

Numerical analysis of Los Andes uplift in South America using deformation energy

Elberg, María^{1*}; González, Leonardo¹; Hidrobo, Francisco² y Aguilar, José³

¹Grupo de Investigación en Geología Aplicada, GIGA

¹Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería

²Departamento de Física, Facultad de Ciencias

³Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

*mariael@ula.ve

Resumen

El objetivo principal de esta investigación es simular numéricamente la interacción de los límites convergentes entre las placas Nazca y Sudamericana, para analizar la energía de deformación unitaria elástica en la zona de subducción y sus efectos en el levantamiento de Los Andes. La metodología aplicada se realiza en dos etapas; la primera corresponde a la selección de constantes geológicas para la simulación y la creación de las geometrías de los modelos con base a coordenadas locales, y en la segunda etapa, se simulan numéricamente los modelos utilizando el método de elementos finitos. Los resultados muestran los campos de energía de deformación y su relación con los desplazamientos, obteniendo valores con errores menores al 2% en alturas máximas de las montañas y 0% en la planicie chilena de la zona central. La distribución de la energía de deformación en cada modelo tiene un comportamiento periódico con picos de concentraciones y liberaciones que afectan el desplazamiento. Las principales conclusiones obtenidas indican que la simulación numérica reproduce de manera exacta los efectos en los límites de las placas estudiadas, permitiendo cuantificar y cualificar la energía de deformación y sus efectos.

Palabras clave: Simulación numérica, placas tectónicas, energía de deformación, elementos finitos.

Abstract

The main objective of this research is to simulate numerically the interactions of convergent boundaries between South American and Nazca plates, to analyze the unitary elastic deformation energy in the subduction zone and its effect on the uplift of Los Andes. The methodology is divided in two stages; the one corresponds to the selection of geological constants for the simulation and the creation of the geometries of the models based on local coordinates, and in the second stage the models are simulated numerically using the finite element method. The results show the energy fields of deformation and its relation with the displacement values obtained with errors less than 2% in the altitudes of the mountains and 0% in the plains of central Chile. The distribution of strain energy in each model has a periodical behavior with peaks and releases that affect the movement. The main conclusions indicate that the numerical simulation reproduces accurately the effects on the edge of the tectonic plates studied, making possible to quantify and qualify the energy of deformation and its effects.

Key words: Numerical simulation, tectonic plates, deformation energy, finite elements

1 Introducción

La mayoría de las investigaciones actuales, por muy específicas que sean, ameritan un análisis multidisciplinario puesto que son numerosas las variables que intervienen en algunos problemas de tipo geológico dada su complejidad.

Adicional a esto, el uso de programas computacionales basados en métodos numéricos permiten obtener soluciones matemáticas a problemas que anteriormente no tenían solución, o cuya solución conocida no podía comprobarse.

Desde hace siglos la geodinámica de nuestro planeta

ha moldeado su superficie, y solo desde hace algunas décadas se han desarrollado teorías que describen la naturaleza de su forma externa y la composición de su interior. Se han logrado inferir también parámetros geomecánicos y definiciones basadas en la relación esfuerzo-deformación donde se incluyen las primeras definiciones de la energía de deformación elástica.

El objetivo principal de esta investigación es simular numéricamente utilizando el método de elementos finitos, el levantamiento de Los Andes Sudamericanos modelando el contacto entre los límites de las placas Sudamericana y Nazca para obtener valores de energía unitaria elástica de deformación y analizar su efecto.

Los objetivos específicos de este trabajo corresponden a la caracterización de los materiales constitutivos de las placas tectónicas en estudio, la obtención de coordenadas locales para la geometría básica y la creación de modelos secundarios a partir del modelo principal, validándolos con estados naturales conocidos. También se analiza la energía de deformación generada en los procesos de subducción, y la correlación numérica de energía, deformación y desplazamientos.

2 Marco Teórico

2.1 Placas Tectónicas

A principios del siglo XX, es propuesta la teoría de la Deriva Continental (citado por Tarbuck, 1999), la cual indica que los continentes se mueven sobre la superficie del planeta. Investigaciones posteriores llevaron al conocimiento de la Tectónica de Placas, la cual establece que la Litósfera está fragmentada en una serie de placas que se desplazan sobre la Astenósfera. Esta teoría también describe el movimiento de las placas, sus direcciones e interacciones.

La fig. muestra las placas Sudamericana y Nazca las cuales se encuentran ubicadas en el hemisferio Sur, la primera es una placa de corteza mixta con un sector continental correspondiente a América del Sur y un sector oceánico bajo el Atlántico, y la segunda se considera una placa de tipo oceánico ubicada bajo el Océano Pacífico. Estas placas tienen un contacto de tipo convergente entre ellas generando zonas de subducción y todas las características asociadas debido a los esfuerzos compresivos que actúan sobre ellas.

Todas las placas del planeta se desplazan sobre la superficie finita de la Tierra y éstas interactúan unas con otras a lo largo de sus fronteras provocando intensas deformaciones en la Litósfera, lo que da lugar a grandes cadenas montañosas, fosas oceánicas de gran profundidad, sistemas volcánicos importantes y sistemas de fallas activas.

La energía de deformación generada y acumulada en estos procesos geológicos es el centro de esta investigación utilizando para esto simulación numérica con base al método de elementos finitos.



Fig. 1. Esquema de placas tectónicas Nazca y Sudamericana

2.2 Energía de Deformación Elástica

La energía de deformación es la energía interna acumulada en el interior de un sólido deformable como resultado del trabajo realizado por las fuerzas que provocan una deformación. Esta investigación utiliza energía unitaria respecto a su volumen o superficie, con unidades adimensionales.

Cuando un sólido se deforma aumenta su energía interna y ocasiona deformaciones irreversibles o reversibles dependiendo de la intensidad de la carga aplicada y de las características de los materiales constitutivos (Elberg y Febres, 2003). Es por esto que la energía de deformación se puede usar para establecer las respuestas de estructuras frente a cargas estáticas y dinámicas.

En la fig. 2 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación donde se denomina P_1 un valor cualquiera de la carga entre cero y el valor máximo P , y δ_1 corresponde al alargamiento de una barra cualquiera. Si ocurre un incremento dP_1 en la carga, producirá un incremento $d\delta_1$ en el alargamiento, (Gere, 1998). El trabajo realizado por la carga durante este alargamiento es el producto de la carga y la distancia por la cual se mueve, según se indica en la ecuación 1 y el área sombreada bajo la zona elástica de la curva carga-desplazamiento representa este trabajo. El trabajo total hecho por la carga al pasar de cero al valor máximo P es la suma de todas las franjas elementales. Por el principio de la conservación de la energía se tiene que esta energía de deformación es igual al trabajo hecho por la carga, siempre que no se reste o agregue energía en forma de calor, por lo tanto:

$$\text{Trabajo} = \text{Energía} = \int_0^{\delta} P_1 d\delta_1 \quad (1)$$

Si cesa el efecto de la carga P sobre el elemento, la barra recuperará totalmente su longitud inicial si no han sido

sobrepasados los límites de elasticidad.

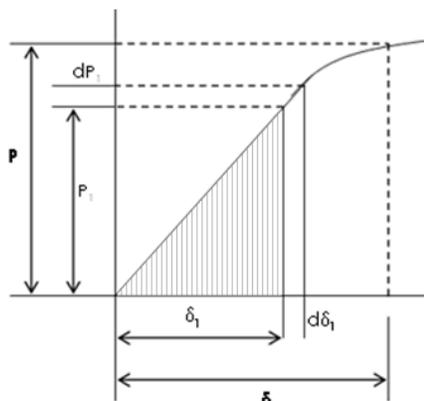


Fig. 2. Diagrama Esfuerzo-deformación

2.3 Teoría del Rebote Elástico

Esta teoría utiliza los conceptos de energía elástica de deformación, su concentración y posterior liberación relacionada, en muchos casos, con el mecanismo de generación de sismos.

Las investigaciones de Harry Reid, (citado por Tarbuck, 1999), indican que las fuerzas tectónicas van deformando con gran lentitud las rocas de la Corteza a ambos lados de la falla y almacenan energía de deformación elástica. Al ser superada la resistencia que mantiene unidas las rocas se produce un deslizamiento en los puntos más débiles, provocando el aumento de esfuerzos en las zonas más alejadas a lo largo de la falla, donde se producirá un nuevo deslizamiento hasta liberar la mayor parte de la energía de deformación acumulada, permitiendo así que la roca deformada vuelva a su posición original. Este salto atrás de las rocas se denomina Rebote Elástico, dado que la roca se comporta como una banda de goma cuando es liberada.

La teoría del Rebote Elástico se aplica a las zonas de contacto entre dos placas tectónicas que se extienden generalmente a lo largo de cientos o miles de kilómetros. Las placas en un paso de análisis inicial, están unidas y no se desplazan, pero se deforman continuamente debido a la acción de las fuerzas terrestres generados por empuje o tracción de otras placas tectónicas. Este proceso de deformación continuará mientras que las rocas de la zona de contacto puedan comportarse elásticamente, almacenando energía de deformación. Cuando las rocas no soporten más deformación se romperán, permitiendo que las placas tectónicas se deslicen o reboten repentinamente hasta alcanzar una posición de equilibrio. Cuando esto ocurre, la energía elástica almacenada durante el período de deformación se libera y se propaga en todas direcciones a partir del lugar donde se inicia la ruptura, bajo la forma de ondas elásticas.

Las rocas son elásticas y susceptibles de almacenar energía de deformación, (Sauter 1989), bajo el mismo principio que un resorte comprimido. Cuando los esfuerzos que

actúan sobre los lados opuestos de una falla sobrepasan la fuerza que los mantiene unidos, ocurre una liberación repentina y violenta de la energía almacenada en la roca.

3 Metodología

El esquema de desarrollo de trabajo se fundamenta en dos etapas fundamentales: primero la definición geomecánica de parámetros y constantes para ser utilizados en la simulación, y segundo, la creación de los modelos de simulación y el efecto de subducción entre las placas con la simulación numérica de los modelos con análisis elástico lineal.

Etapa I. Caracterización Geomecánica

La primera etapa de la investigación consiste en la caracterización geomecánica de las placas tectónicas Nazca y Sudamericana. Para esto se obtienen las coordenadas locales de las placas en estudio, definiendo límites superficiales y en profundidad, con base a observaciones de imágenes de satélite y datos sísmicos. Estas coordenadas son la base de la geometría de los modelos numéricos.

La geometría tridimensional del modelo principal se considera optimizando linealmente los contactos en superficie. La Tabla 1 muestra las coordenadas obtenidas tomando 19 puntos para la placa Sudamericana y 17 puntos para la placa de Nazca. La fig. 3 presenta la gráfica de las placas en estudio.

Tabla 1. Coordenadas locales de placas Sudamericana y Nazca

Placa Sudamericana		Placa Nazca	
x	y	x	y
3.9	8.2	1	7.2
4.5	8.3	2.2	7.2
5	8.4	2.4	7.4
5.4	8.5	3.2	7.5
5.4	8	2.5	6.5
6.2	7.2	3.5	6
7.9	7	3	3.8
7.6	4	2.6	4
8.7	3	2.6	4.3
7	2.4	1.8	4.4
7	3	1.8	4.7
3.5	3	0.9	4.7
3	3.8	0.8	5
3.5	6	0.4	5.8
2.5	6.5	0.4	6.3
3.2	7.5	1	6.8
4	7.5	1	7.2
4.2	7.9	-	-
3.9	8.2	-	-

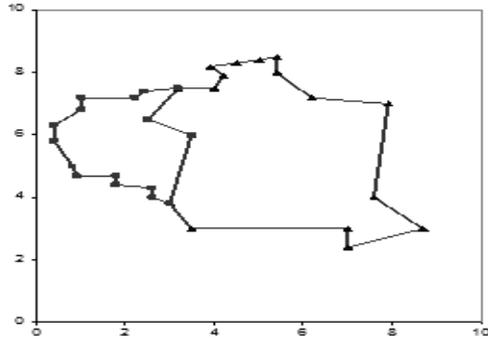


Fig. 3. Placas Sudamericana y Nazca en coordenadas locales.

Un aspecto importante es la sismicidad de la zona mostrada en la fig. 4 que presenta la distribución de los sismos según la profundidad del foco sísmico en la zona de contacto convergente entre la placa oceánica y la placa continental. Esta información sirve para delimitar los efectos de la subducción y compararlos con los resultados numéricos de la simulación.

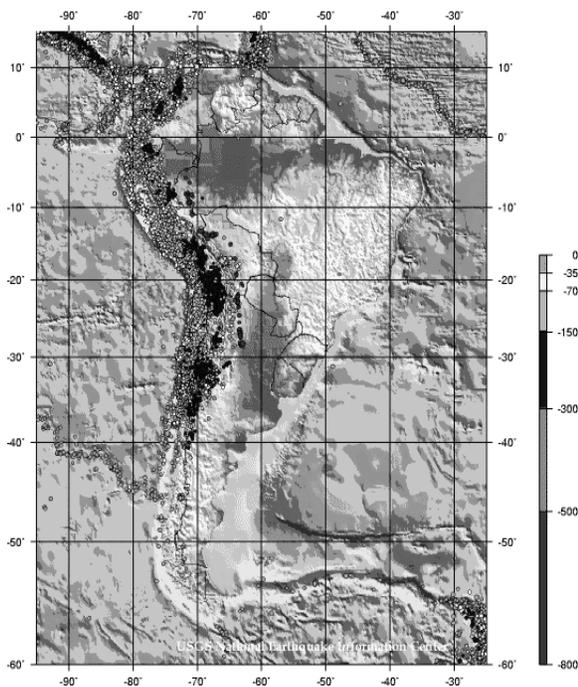


Fig. 4. Sismicidad según la profundidad del foco en Sudamérica 1900-2008

Tabla 2. Valores de Litósfera y Corteza para las placas Oceánica (Nazca) y Continental (Sudamericana). (Turcotte, 1988).

	Litósfera	Corteza Oceánica	Corteza Continental
E	1.62 E 17	0.6 E 17	0.83 E 17
ν	0.28	0.25	0.25
ρ	3.36E+12	2.95E+09	2.70E+09

Etapa II. Modelado y simulación

Los modelos geomecánicos realizados para la simulación corresponden a geometrías basadas en las coordenadas locales obtenidas para las placas, generando el modelo principal con características complejas de forma e interacción, llegando a modelos optimizados que representan el fenómeno físico en estudio.

Se realizaron en total seis (6) modelos, en dos y tres dimensiones tomando en cuenta para todos ellos las condiciones de borde referidas a los tres posibles desplazamientos: U_x , U_y y U_z , y a los tres posibles giros θ_x , θ_y y θ_z . Cada modelo realizado fue estudiado, calibrado y optimizado, desarrollando cada uno en función del análisis que se desea realizar para cada variable a estudiar.

Las condiciones de borde de cada uno de los modelos fueron consideradas para garantizar la continuidad del medio geológico y en base a las direcciones de desplazamientos conocidos generados por el empuje de los mecanismos compresivos de la subducción (Turcotte D, 1988).

Las cargas aplicadas fueron calibradas luego de obtener los desplazamientos verticales conocidos y valorados a estados naturales actuales, siendo la mayor la del Aconagua con 6.962 metros de altura.

La subducción es implementada representando el estado de esfuerzos de compresión de las placas considerando los valores de densidad de Litósfera, Corteza Continental y Corteza Oceánica. Los cambios en las densidades hacen que el borde occidental de la placa Sudamericana cabalque sobre la placa de Nazca, por lo tanto la capa litosférica oceánica desciende producto de las fuerzas tectónicas. (Tarbuck, 1999).

Modelo 1. Corresponde al modelo generalizado en tres dimensiones completo, donde se elabora en base a coordenadas UTM llevadas a coordenadas locales de 0 a 10 unidades en abscisas y ordenadas, como se mostró en la fig. 3.

La fig. 5 muestra el mallado de cada placa con elementos tridimensionales de 6 nodos. La placa Sudamericana cuenta con 2485 elementos y la placa de Nazca con 2150.

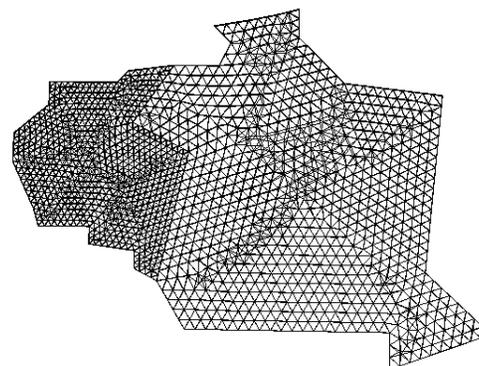


Fig. 5. Mallado de las Placas Sudamericana y Nazca en modelo 1, realizado para simulación

El mallado óptimo se obtiene con la convergencia de resultados con errores menores al 2%.

El modelo general considera los espesores promedio de Corteza oceánica 15 Km y la Corteza continental 40 Km. El espesor completo de Litósfera que incluye las Cortezas corresponde a 100 Km y la Astenósfera 660 Km.

Modelo 2. Es una simplificación bidimensional del modelo principal donde se simula el límite superficial entre las placas, marcado por un brusco cambio en la dirección principal. La continuidad y efecto de las placas vecinas y el resto de la geometría de cada placa se garantiza con las condiciones de borde y la optimización del modelo en dos dimensiones, en el plano XY.

Modelo 3. Este modelo es creado en tres dimensiones y complementa el modelo anterior agregando efecto de colisión frontal. Cuenta con dos particiones modeladas por separado y la simulación del contacto y choque entre las placas.

Modelo 4. Presenta un ángulo de contacto de 45° , calibrado con los resultados de los modelos anteriores. Las condiciones de borde y de carga son iguales a las del modelo 3. Corresponde a un siguiente paso en el modelado numérico dado que se utilizan resultados de los modelos anteriores para la creación de su geometría.

Modelo 5. Este es un modelo tridimensional que se realiza utilizando las condiciones de borde que permiten la simulación de la corteza oceánica y continental, y el efecto de subducción. El ángulo utilizado es menor a 30° . Esta geometría se obtiene con base a los resultados del modelo 4.

Modelo 6. Este modelo se hace en tres dimensiones con el objetivo de observar los campos de distribución de desplazamientos y de energía, relacionados con el levantamiento de Los Andes y la formación de la Fosa de Nazca. El modelo hace un análisis con las componentes de cargas compresivas en una geometría de gran profundidad. Se toman todas las características geológicas de las placas Nazca y Sudamericana, partiendo de un estado de deformación inicial cero para la fosa y la cordillera

4 Presentación y análisis de resultados

Resultados de Modelo 1

Este modelo muestra la geometría principal de las placas Nazca y Sudamericana utilizando las coordenadas locales. El efecto simulado corresponde al empuje de la placa Nazca sobre el sector continental de la placa Sudamericana.

La fig. 6 muestra la distribución de la energía de deformación en la placa Sudamericana, donde la gama de grises en la fig. indica los niveles de distribución de la energía, siendo los mas oscuros los de mayor valor.

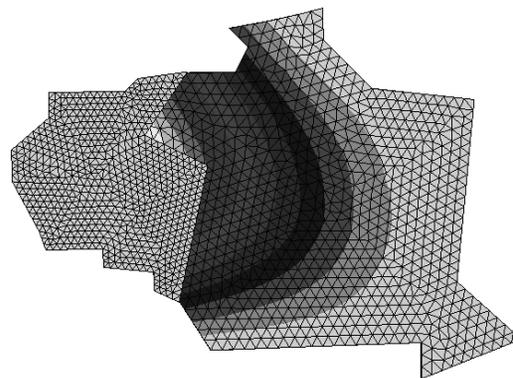


Fig. 6. Campo de distribución de energía de deformación en la placa Sudamericana

Si se compara la distribución de la energía en la placa Sudamericana con la distribución de la sismicidad mostrada en la fig. 4, se observa la ocurrencia de sismos en la zona cercana a las coordenadas $10S40W$, lo que corresponde al punto (12.5, 6.5) en coordenadas locales. Se nota en la zona señalada con un círculo en la fig. 7, que los sismos son escasos y de foco superficial. Esto es importante, ya que en la simulación realizada la energía de deformación es muy baja, y comparándola con la ubicación de los sismos en la zona media de la placa esta coincide, permitiendo visualizar el efecto de la placa de Nazca sobre la placa Sudamericana y su relación directa con la sismicidad de la zona.

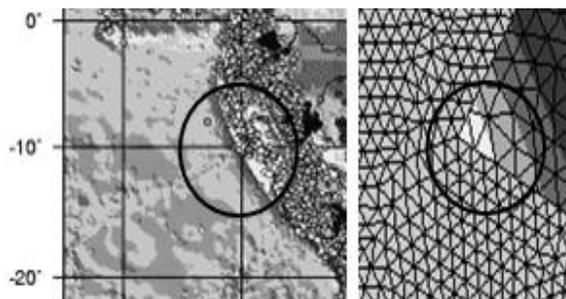


Fig. 7. Densidad de sismos y distribución de energía de deformación en zona media

Analizando ahora la zona sur de la placa Sudamericana, se observa que existe una concentración de energía que se corresponde con la densidad de ocurrencia de sismos, siendo moderado en el límite inter-placa, de mayor profundidad en la zona intermedia donde se observa el sombreado mas oscuro obtenido en el modelo de simulación y luego de baja intensidad en conjunto con la profundidad del sismo. Por otro lado, en la zona inferior se muestra la disminución de sismos de foco profundo lo que se relaciona con el modelo, ya que la energía decrece manteniendo la relación.

La coincidencia de la simulación numérica con la realidad natural del medio es notable.

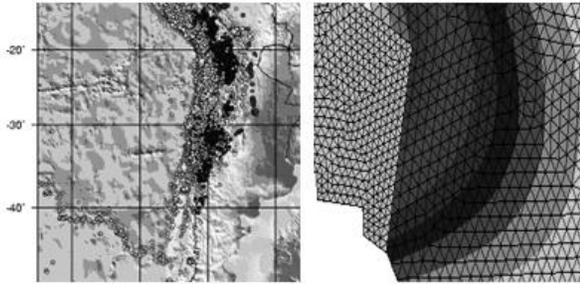


Fig. 8. Densidad de sismos y distribución de energía de deformación en zona sur

Resultados de Modelo 2

Este modelo muestra en dos dimensiones el efecto de subducción provocado por el empuje de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Puede observarse (fig. 9), el progresivo efecto de la convergencia inter-placa, mostrado en la simulación a través del mallado deformado. El modelo presenta los desplazamientos en proyección 2D del efecto de subducción, realizado para validar los efectos compresivos de la placa de Nazca.

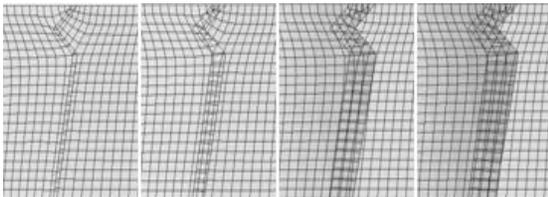


Fig. 9. Efecto de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, vista en planta

Resultados de Modelo 3

El modelo 3 es una representación tridimensional del modelo anterior realizado para analizar los campos de desplazamiento de la placa de Nazca. La fig. 10 muestra este desplazamiento observándose el cambio en la pendiente paralela de la escala de grises al hacer contacto con la placa Sudamericana. Puede observarse la zona superpuesta en el mallado del modelo la cual representa la subducción vista en planta, y los tonos claros en el centro de la figura, que indican un descenso en la placa de Nazca al establecer el contacto con la placa Sudamericana.

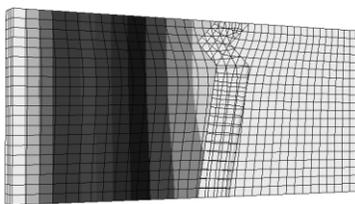


Fig. 10. Campo de desplazamiento en la placa de Nazca

Resultados de Modelo 4

El modelo 4 es una aplicación del modelo anterior ya que representa en tres dimensiones el efecto de subducción señalado anteriormente.

Se observa el efecto convergente y la formación característica del ángulo promedio de 45° aproximadamente. En este modelo puede observarse la formación de la fosa oceánica a la izquierda de las líneas paralelas que indican el ángulo señalado. Se observa también una ligera elevación a la derecha de las líneas paralelas de la fig. 11 indicando la formación de la zona montañosa.

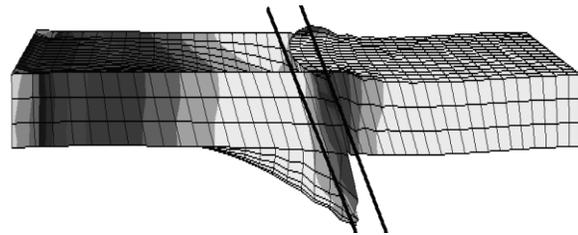


Fig. 11. Campo de desplazamientos y deformación de modelo 4.

Resultados de Modelo 5

Este modelo muestra el efecto de la Litósfera oceánica descendiendo bajo la Litósfera continental. Se basa en condiciones de borde que garantizan la continuidad del medio y el desplazamiento sobre la Astenosfera.

Es un modelo numérico logrado luego de la verificación y análisis de los modelos anteriores, obteniendo un importante nivel de optimización.

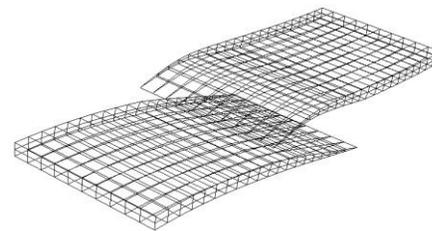


Fig. 12. Mallado deformado del modelo 5, placa de Nazca a la izquierda y placa Sudamericana a la derecha

La energía de deformación en este modelo se observa principalmente en la sección de elevación de la zona montañosa de la placa Sudamericana, indicada con tonos claros de gris en la fig. 13.

La acumulación de energía de deformación, al trabajar en rangos elásticos, indica deformaciones lineales intensas, no determinadas por inicio de plasticidad o liberación de

calor. Es un proceso continuo dado por los efectos compresivos de Nazca detenido al llegar a estados naturales conocidos determinados por alturas promedio en Los Andes.

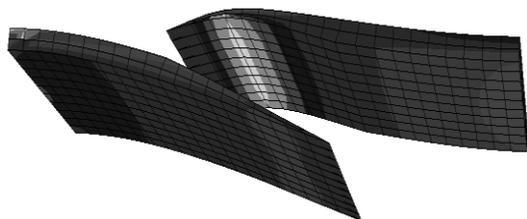


Fig. 13. Campo de energía de deformación en modelo 5

Resultados de Modelo 6

Este modelo en 3D muestra los efectos en profundidad de la energía de deformación generada y su dispersión.

Los efectos producto de la compresión, son mostrados en el campo de energía que indica elevaciones en los sectores ocupados actualmente por la Cordillera de los Andes mostrado en los tonos oscuros en la fig. 14, lo cual indica una concentración que provoca desplazamientos verticales de material. Por otro lado, el sector con sombreado claro, indica concentraciones de energía de deformación que producen movimientos verticales descendentes. Para la interpretación física del modelo, corresponde a la fosa oceánica característica de los límites convergentes.

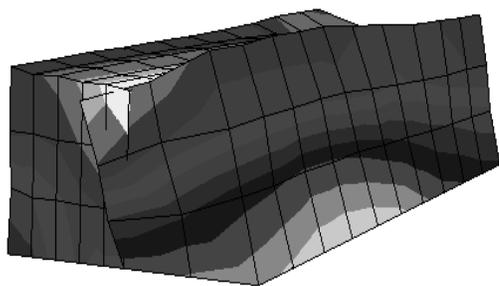


Fig. 14. Deformación de modelo 6 y el campo de energía

Resultados de la correlación de la energía de deformación en los diferentes modelos

Numéricamente, la energía de deformación para el modelo 1 muestra comportamiento periódico para diferentes estados de tiempo indicando efectos de desplazamiento en cada liberación. La fig. 15 presenta tres espacios notorios con tres picos de máximos periódicos para 180 elementos.

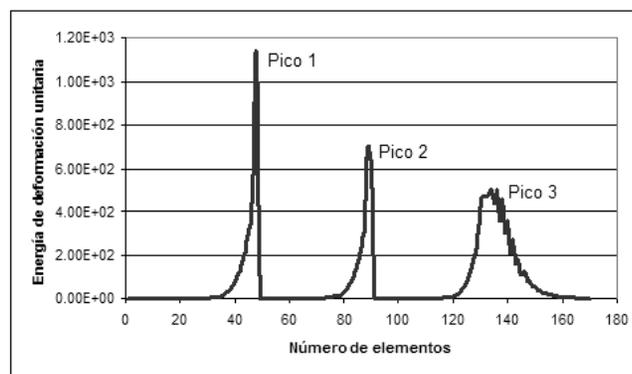


Fig. 15. Energía de deformación unitaria para 180 elementos de placa Sudamericana de modelo 1

La fig. 16 muestra la acumulación de energía de deformación unitaria en el incremento del primer pico llegando a 1117 (valor adimensional), seguido por un repentino descenso lo cual indica una liberación rápida. La energía no llega a valores nulos, sin embargo alcanza los 9E-10.

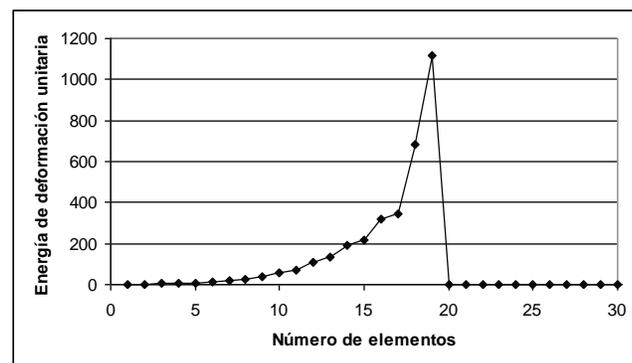


Fig. 16. Detalle de Pico 1 mostrando 30 elementos de placa Sudamericana de modelo 1

Un ejemplo práctico para comprender estos gráficos corresponde a un arquero que estira su arco para lanzar una flecha, el estiramiento se hace progresivo, se acumula energía en el sistema la cual es liberada bruscamente al soltarlo. Esta afirmación es aplicable a la definición de energía elástica en la zona de estudio, dado que las rocas se consideran capaces de almacenar energía elástica, (Sauter, 1989).

El segundo pico tiene máximos en 700, seguido de liberación repentina en dos puntos hasta 1.22E-06. El tercer pico también muestra acumulación de energía, pero en este caso la acumulación y la liberación son progresivas. La Tabla 3 muestra estos valores para 80 elementos, donde se llega a un máximo de 500.

Tabla 3. Energía de deformación de modelo 1 mostrado para 80 elementos (El)

Energía de Deformación unitaria de modelo 1							
El	Energía	El	Energía	El	Energía	El	Energía
1	0.01	21	12.43	41	356.5	61	7.22
2	0.01	22	19.43	42	207.7	62	5.47
3	0.01	23	26.22	43	269.5	63	5.08
4	0.02	24	40.9	44	160.2	64	3.71
5	0.03	25	54.28	45	175.8	65	3.36
6	0.05	26	82.63	46	112.3	66	2.55
7	0.07	27	108.1	47	122.7	67	2.34
8	0.11	28	152	48	77.93	68	1.72
9	0.15	29	203.2	49	77.74	69	1.52
10	0.22	30	251.3	50	54.3	70	1.18
11	0.29	31	414.9	51	53.65	71	0.83
12	0.44	32	465.9	52	36.56	72	0.6
13	0.61	33	466.7	53	34.37	73	0.55
14	0.93	34	486.8	54	25.32	74	0.44
15	1.31	35	500.5	55	23.92	75	0.37
16	2.01	36	439.2	56	17.04	76	0.36
17	2.76	37	500.8	57	15.6	77	0.28
18	4.26	38	359.6	58	11.76	78	0.29
19	5.86	39	452.9	59	10.95	79	0.2
20	9.1	40	303.4	60	7.95	80	0.21

La fig. 17 muestra el comportamiento de la energía de deformación en la placa Sudamericana en 80 elementos representados por la zona de mayor concentración de energía.

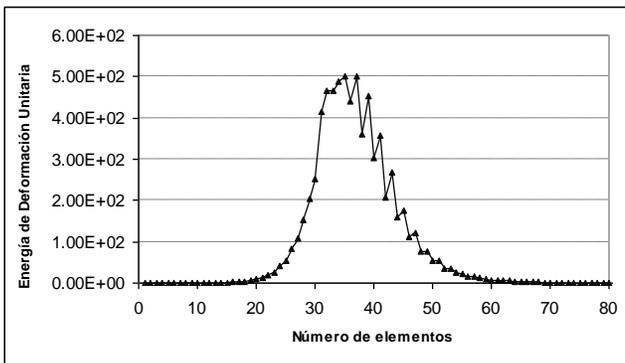


Fig. 17. Energía de Deformación en modelo 1 para 80 elementos

Los resultados de los desplazamientos verticales son representativos en los modelos 4, 5 y 6. Son modelos realizados para medir los efectos en altura para la Cordillera de Los Andes y profundidad para la fosa de Nazca. La tabla 4 muestra los desplazamientos verticales obtenidos en estos modelos.

Tabla 4. Desplazamiento vertical de zonas representativas de los modelos 4, 5 y 6

Desplazamiento Vertical (Km)			
Zona	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
1	-6.32	-4.09	-9.88
2	-5.36	-3.31	-8.49
3	-4.41	-2.32	-7.09
4	-3.45	-1.44	-5.71
5	-2.49	-0.53	-4.31
6	1.01	0.95	0.32
7	1.22	1.24	1.52
8	1.34	2.09	1.28
9	2.3	2.93	2.66
10	3.26	3.81	4.05
11	4.22	4.73	5.44
12	5.18	5.61	6.84

Los resultados de los desplazamientos verticales se han dividido en 12 zonas características. Estas zonas están mostradas en la fig. 18 donde se presentan graficados los desplazamientos en valores positivos para elevaciones y negativos para profundidad

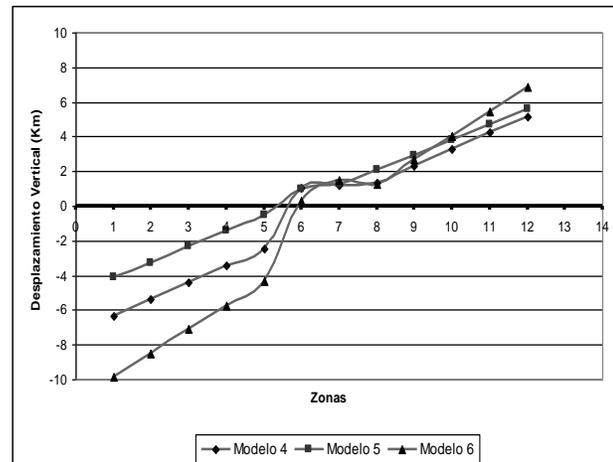


Fig. 18. Desplazamiento vertical de modelos 4, 5 y 6, de las Zonas 1 a la 12

De la zonas 1 a la zona 5 corresponde el sector del corte de a la fosa oceánica de Nazca. Los valores obtenidos máximos oscilan entre 6320 mts, 4090 mts y 9880 mts, siendo un valor aceptado de profundidad de la fosa 8100 mts, (Tarbuck, 1999). La variación de estos resultados se debe principalmente a que en la simulación no se utilizaron cambios de temperatura o densidad de los datos específicos de profundidad litosférica.

Las zonas 6 a 7 corresponden a la depresión intermedia de Chile, la cual tiene una altura promedio de 1000 mts como lo muestra la fig. 19. Los datos obtenidos en la simu-

lación tienen un promedio también de 1000 mts. La Cordillera de la Costa no se considera en este análisis ya que su formación fue anterior a la Cordillera de Los Andes.

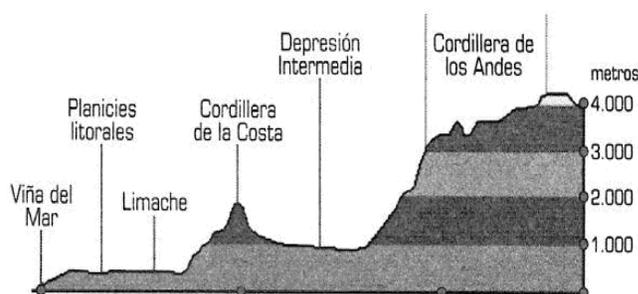


Fig. 19. Relieve de Zona Central de Chile, 33° de latitud Sur

Las zonas 8 a 11, forman parte del sistema montañoso con valores variables de 1300 mts a 4000 mts aproximadamente.

La Zona 12 corresponde a las máximas elevaciones en Los Andes producto del empuje de la placa de Nazca. Para el modelo 1 se tienen elevaciones de 5.18 Km, el modelo 2 de 5.61 Km y el modelo 3 de 6.84 Km. Esta zona corresponde a la Cordillera de Los Andes donde hay grandes alturas de unos 6000 mts con altiplano cercano a 4000 mts.

Los valores de elevaciones encontrados en los modelos indican que la energía de deformación obtenida para los modelos de análisis 3D, en los desplazamientos verticales, es la que ha originado el actual relieve chileno.

Solo se consideran fuerzas endógenas compresivas de la tectónica de la zona. No se toman en cuenta las fuerzas exógenas que actúan en el medio ambiente que modelen los perfiles de la zona.

5 Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas en esta investigación son las siguientes:

El uso de métodos numéricos en ciencias geológicas es una herramienta poderosa para los estudiosos de la geología científica-aplicada, ya que permite obtener soluciones a problemas que anteriormente no tenían solución o las soluciones conocidas no podían ser verificadas matemáticamente.

La simulación numérica en este trabajo incluye la obtención de coordenadas locales de las placas tectónicas Nazca y Sudamericana, las cuales son utilizadas para crear las geometrías de los modelos de simulación. Cada modelo recrea condiciones específicas de efectos compresivos de la placa oceánica y la placa continental, para determinar diferentes valores en diversas etapas de la simulación, logrando energía de deformación unitaria elástica y desplazamientos.

El trabajo hace un estudio macro de los efectos de subducción concentrando su aplicación en la zona ubicada entre los 0° y 35° de latitud sur.

La metodología utilizada en esta investigación permite la aplicación a diversos problemas de índole geoestructural, pudiendo validar los modelos con parámetros de tipo regional e incluso locales, para obtener resultados puntuales en zonas más específicas de estudio.

Los valores de temperatura y densidad no se incluyen en los modelos a grandes profundidades ya que la intención de esta investigación es dar respuesta en función de la energía unitaria de deformación utilizando constantes geológicas conocidas y validadas, no inferidas como es el caso de variables a gran profundidad en niveles cercanos al manto superficial.

Se consideran valores de comparación máximos las diversas alturas de la Cordillera de Los Andes desde los 6972 mts del monte Aconcagua hasta los 1000 mts promedio de la planicie chilena en su zona central. De igual manera, se considera la profundidad de la fosa de Nazca de 8100 mts.

Todos los modelos creados en dos y tres dimensiones representan gráfica y numéricamente los efectos convergentes entre las dos placas. Estos modelos han sido validados durante la investigación considerando la geometría, las propiedades de los elementos constitutivos, el mallado, las cargas actuantes, las condiciones de borde y el análisis estático lineal realizado en la simulación.

La geometría de cada modelo se basa en las coordenadas locales obtenidas para el modelo 1. Los modelos 2 y 3 son realizados para validar en planta los efectos compresivos horizontales. Los modelos 4, 5 y 6 muestran los desplazamientos verticales. Al reproducir estos efectos se obtienen valores de energía y desplazamiento, pudiendo aplicar esta metodología para cálculo de otros efectos como esfuerzos y reacciones de materiales específicos.

Con los resultados del modelo 1 se concluye que la energía de deformación unitaria elástica tiene relación directa con la ocurrencia de sismos en las zonas donde su concentración es elevada y coincide con la ubicación de los eventos de grandes profundidades en zonas donde la elevación de Los Andes ha ocurrido durante miles de años.

Los modelos 2 y 3 representan el avance horizontal de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, mostrando efectos en planta cuyos resultados permiten la creación de los modelos para estudio de elevaciones y depresiones con análisis verticales.

En el modelo 4 la fosa oceánica mostrada supera la 6000 mts de profundidad con planicie cercana a los 1000 mts y elevaciones máximas de 5000 mts aproximadamente. Es un modelo que muestra la subducción como efecto primario siendo el levantamiento de material un efecto producto de la convergencia de placas, tal como es el caso de la realidad natural reproduciendo apropiadamente la zona de la planicie chilena y las elevaciones.

El modelo 5 representa la Litósfera oceánica y su efecto en la Litósfera continental. Es un modelo que incluye geometría y condiciones de borde optimizadas para simular el movimiento de subducción, llegando a valores de pro-

fundidad en la fosa cercanos a 4000 mts, planicie chilena de 1000 mts y elevaciones en zona montañosa cercanas a 5500 mts. Este modelo muestra resultados conservadores a nivel de la fosa ya que no se consideran los efectos térmicos que indican cambio en el estado del material que modifican sus propiedades y comportamiento.

El modelo 6 incluye en su geometría mayor profundidad llegando con la simulación a resultados en la zona de montaña de casi 7000 mts, la planicie chilena mantiene el promedio constante de 1000 mts y la fosa oceánica llega a los 10 km de profundidad.

En todos los modelos se puede observar que las elevaciones son simuladas con propiedad ya que se toman en cuenta los principales componentes de los materiales constitutivos de la zona montañosa y de la planicie chilena. Los valores promedio dados en la bibliografía actual son tomados literalmente utilizando siempre constantes confirmadas y verificadas por bibliografía reconocida. Es por esto que se consideran apropiados los valores de energía de deformación unitaria encontrados con la simulación numérica.

La energía de deformación unitaria varía entre 0.01 y 1100. Se observan concentraciones y liberaciones antes de un desplazamiento importante, efecto que ha gobernado en gran parte la formación de Los Andes. Según los resultados obtenidos, se estima un error menor al 2%.

La energía de deformación obtenida en la fosa oceánica se considera bajo estudio ya que la diferencia con los valores reales están en el orden del 15% en los modelos 4 y 6 al correspondiente aceptado como máxima profundidad de la fosa. Se debe tener presente que no es una zona que ha sido estudiada a detalle por las características de difícil acceso al área.

La optimización de los modelos en relación a su geometría, mallado y condiciones de borde es importante ya que permite analizar los efectos geodinámicos de las placas Nazca y Sudamericana con exactitud, reproducir las grandes altitudes de la cordillera andina donde se representan los valores más altos y los aceptados como promedio. Con esta validación de desplazamiento vertical se confirma la generación de energía de deformación unitaria ocupada en el proceso de orogénesis de Los Andes.

La metodología utilizada puede ser aplicada para verificar la energía de deformación en zonas específicas agregando características locales no generalizadas con lo cual se puede conocer el comportamiento de determinadas áreas.

La simulación numérica aplicada al estudio de efectos geológicos es un paso importante en las investigaciones donde se incluyen problemas complejos con variables, constantes y condiciones que deben ser estudiadas desde diversos puntos de vista validando los métodos matemáticos utilizados, los parámetros geomecánicos incluidos en el estudio y los resultados. Es una herramienta importante que abre las puertas al análisis de problemas que no tenían una solución matemática exacta o cuya solución conocida no podía implementarse.

Referencias

- Corredor F, 2002, Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America, Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, 20 Oxford Street, Cambridge, MA 02138, USA.
- Dyksterhuis S, Albert R, and Müller R, 2004, Finite-element modelling of contemporary and palaeo-intraplate stress using ABAQUS™ School of Geosciences and University of Sydney Institute of Marine Science, Edgeworth David Building (F05), University of Sydney, Australia.
- Elberg M y Febres H, 2003, Proceso automatizado de refinamiento H-Adaptativo basado en índices de Energía de Deformación, Universidad de Los Andes, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol, 25, N° 3.
- Gere J y Timoshenko S, 1998, Mecánica de Materiales, International Thomson Editores, México.
- Infante E, Torres R y Elberg M, 2007, Influencia de las condiciones locales en la respuesta sísmica. XIII Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Porlamar, Estado Nueva Esparta, Venezuela.
- Sauter F, 1989, Fundamentos de Ingeniería Sísmica, Editorial Tecnológica de Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Tarback E y Lutgens F, 1999, Ciencias de la Tierra una introducción a la Geología Física, Sexta Edición, Madrid, España.
- Turcotte D, 1988. Geodynamics. Clarendon Press Oxford.
- Zienkiewicz O y Taylor R, 1994, El Método de Los Elementos Finitos, 4ta Edición, Editorial McGraw Hill, Interamericana de España, S.A. España.

Recibido: 15 de enero de 2011

Revisado: 15 de diciembre de 2011