

Enseñanza de los procesos de convección en relación con el movimiento de placas tectónicas y el fenómeno de subducción en la Tierra, una propuesta de aula desde la asignatura de física.

Trabajo de Grado para optar por el título de

Licenciado en Física

Carlos Alberto Robles Méndez

Código: 2017146046

Asesora

Marina Garzón Barrios

LINEA DE PROFUNDIZACION

LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

LICENCIATURA EN FISICA

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL 2021

Agradecimiento.

A mi madre y mis hermanas que, con su amor incondicional han hecho de mí el hombre que soy, su amor y cariño han sido indispensables no solo en este trabajo, sino en toda mi vida. Agradezco que siempre estén conmigo en todos los momentos y les agradezco con todo mi corazón lo que han hecho por mí, las amo con todo mi corazón.

A mi maestra, Marina Garzón Barrios, que indudablemente con su guía y apoyo se ha hecho posible la realización de este trabajo, su experiencia, paciencia y han sido muy importante no solo para su culminación, sino en mi futuro como docente. Mil y mil gracias maestra.

A ti, Laudith Álvarez, mi osa, tu amor en esta última etapa de mi vida ha sido muy importante y me has dado la fuerza para culminar este proyecto que, a mi parecer, ha sido de lo más grande que he realizado, gracias por tu amor y apoyo.

Por último, a mi tío José Méndez, su ayuda y apoyo brindándome su hogar y su cariño fueron importante para mí, gracias tío.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	1
1 Los fenómenos de convección y su relación con el interior terrestre.....	6
1.1 El planeta y sus mecanismos de transferencia de calor.....	6
1.2 El fenómeno de convección y su relación con el interior terrestre.....	8
1.3 La convección de Rayleigh-Bénard.....	12
2 El interior terrestre, su descripción y movimiento interno.....	14
2.1 La subducción como proceso geológico terrestre.....	14
2.2 La subducción, interacción que se da entre bordes convergentes.....	17
2.3 La relación entre convección y subducción.....	20
3 Modelos de placa, pasivo y activo.....	22
3.1 Modelo Pasivo: Movimiento de placas por celdas convectivas de Rayleigh-Bénard.....	22
3.2 Modelo Activo: Movimiento tectónico por medio de la convección y tirón de placa.....	26
3.1 La idea de modelación para su aplicación en el aula.....	28
4 La experimentación como propuesta de aula para la discusión del proceso de subducción...	30
4.1 Propuesta de enseñanza sobre el fenómeno de subducción.....	32
4.1.1 Primer momento.....	32
4.1.2 Segundo momento.....	36
4.1.3 Tercer momento.....	43
5 Conclusiones.....	47
6 Referencias.....	51
7 Anexos.....	53
7.1 Capas internas de la Tierra.....	53

Índice de Figuras.

Figura 1. <i>Expulsión de agua a través de un Géiser.....</i>	6
Figura 2. <i>Gradiente Geotérmico del Planeta</i>	11
Figura 3. <i>Celdas de Convección.....</i>	12
Figura 4. <i>Patrones Convectivos en una Placa.....</i>	13
Figura 5. <i>Cinturón de Fuego del Pacífico</i>	14
Figura 6. <i>Las diferentes Capas de la Tierra.....</i>	15
Figura 7. <i>Bordes de Placa y su Comportamiento.....</i>	16
Figura 8. <i>Subducción de Placas</i>	18
Figura 9. <i>Las Capas de la Tierra</i>	19
Figura 10. <i>Flujo en el interior de la placa</i>	20
Figura 11. <i>Modelo de Placa Pasivo</i>	22
Figura 12. <i>Orientación de los Fluidos en el Plano</i>	24
Figura 13. <i>Modelo de estratificación a 660 kilómetros.....</i>	25
Figura 14. <i>Modelo de Convección de todo el Manto y Modelo de Convección de Capa Profunda</i>	26
Figura 15. <i>Rotación de un par de Placas</i>	28
Figura 16. <i>Logo programa</i>	38
Figura 17. <i>Comparación entre registro sonoros.</i>	42
Figura 18. <i>Terremoto en un punto del planeta</i>	53
Figura 19. <i>Mapa conceptual de ondas internas</i>	54
Figura 20. <i>Desviación de Ondas Sísmicas</i>	55

Introducción.

Si hay algo en el universo que ha fascinado a todos los seres humanos, es sin lugar a dudas nuestro planeta, la Tierra. Desde la formación del mismo hace aproximadamente unos 450 millones de años, hasta la época actual, ha sufrido (y sigue sufriendo) una gran cantidad de procesos (por ejemplo, la actividad sísmica, la volcánica etc.) y cambios que han hecho de ella el lugar tal cual conocemos hoy.

La afirmación anterior implica que nuestro planeta no tendría la misma forma¹ ahora que hace 500 o 600 millones de años o quizás más, y la respuesta a esto es que sí, la tierra no presentaba esa imagen que conocemos actualmente de los continentes, sino que se fue formando gradualmente con el tiempo. Presumiblemente, el primero en determinar esta configuración fue el meteorólogo alemán Alfred Wegener en el año de 1910 cuando se da cuenta que América y África (que en los mapas ya presentaban mayor grado de precisión) encajaban entre sí, de hecho, no solo él llegaba a esa conclusión, sino científicos de diversas ramas de la ciencia. Todos desde sus respectivas ramas del conocimiento llegaban al mismo razonamiento, en su libro (Weneger, 2018) lo expresa de la siguiente manera:

“Los paleontólogos, así como los zoólogos y botánicos, llegan una y otra vez a la conclusión de que la mayoría de los continentes separados hoy por anchos océanos ha debido tener en el pasado conexiones terrestres a través de las cuales se efectuó, sin impedimentos, un intercambio de la fauna y la flora terrestres.”

Después de esto, se realizaron diferentes trabajos para corroborar aquello que la ciencia mostraba y estaba en concordancia con las predicciones hechas por Wegener, por ejemplo, la explicación de semillas vegetales encontradas tanto en América como en la Antártida.

Wegener sugiere por tanto que la Tierra debía, en el pasado geológico, haber estado unida por una sola masa, llamada *Pangea*. Debemos aclarar que, en teoría, no fue Wegener el primero en usar la palabra *Pangea* para hacer alusión a la unión de los continentes en el pasado geológico, sino se debe al científico John William Evans presidente de la Royal Society de Londres entre los

¹ Con forma, me refiero a la distribución actual de los continentes.

años de 1924 a 1926². Ahora, si bien la idea de los continentes encajaba, Wegener no podía explicar a ciencia cierta cuál era la fuerza (o el mecanismo) capaz de producir el movimiento hasta la forma que actualmente tienen (Tarbuck & Lutgens, 2005), Wegener fallece en el año de 1930 sin poder dar una explicación satisfactoria relacionada con esa dinámica. Fue 20 años después cuando, a partir de 2 modelos físicos, se logra completar y dar explicación de esta problemática, los dos enfoques vienen de la física y se basan en el *paleomagnetismo* y la exploración del fondo oceánico que, a fin de cuentas, se relaciona con la convección interna del planeta (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Aunque en este trabajo, no se aborda el paleomagnetismo, presentamos aquí dos definiciones. Una según (Pueyo, 2008) que dice “El Paleomagnetismo es el estudio del campo magnético Terrestre registrado por las rocas en el momento de su formación o durante procesos geológicos relevantes acaecidos con posterioridad” y la otra según (Tarbuck & Lutgens, 2005) “los minerales magnetizados no sólo señalan la dirección hacia los polos (como una brújula), sino que también proporcionan un medio para determinar la latitud de su origen” podemos decir entonces que hace referencia al registro que tienen las rocas con el campo magnético de la Tierra. Con dicho registro se determina la posición aparente de las rocas y así se llegaba a dar fuerza a la idea de la deriva continental³.

La otra prueba, junto con las pruebas paleomagnéticas, es la referente a la expansión del fondo oceánico. A mediados del siglo XX, se había demostrado que en el fondo oceánico existen elevaciones montañosas que son conocidas como *dorsales oceánicas*, estas se expandían lateralmente y como producto se forman los valles de rift. Debemos decir que una de las maneras en cómo se corrobora la expansión es por la actividad sísmica, en donde confirmaba que las dorsales oceánicas se separaban lateralmente. La explicación de este proceso fue dada por Harry Hess y por Robert Dietz en el año de 1962 (Martínez Nyman, 2020), Hess propone que esta expansión es debida al ascenso de material caliente producto de la convección terrestre. Este modelo es explicado a través de celdas convectivas, las ramas de estas celdas hacen subir el

² Este es un pequeño fragmento del pie de página tomado del texto: El origen de los continentes con traducción Castellana y notas de Cándido Manuel García Cruz (García Cruz, 2012), para mayor información consulte la bibliografía de este trabajo.

³ Para una explicación detallada de este estudio ver Tarbuck & Lutgens, 2005, (p. 41)

material proveniente del manto y después se expande lateralmente transportando la superficie oceánica, según (Tarbuck & Lutgens,2005):

“las fuerzas tensionales fracturan la corteza y proporcionan vías de intrusión magmática para generar nuevos fragmentos de corteza oceánica. Por tanto, a medida que el suelo oceánico se aleja de la cresta de la dorsal, es sustituido por nueva corteza”.

En donde nos muestran que el fondo oceánico estaba en expansión, esto fue probado nuevamente a partir del magnetismo, por medio de la inversión magnética⁴, dando lugar a la demostración que efectivamente, el fondo oceánico sí se encuentra en expansión. Dentro de este trabajo se mostrará este modelo convectivo, para así compararlo con los modelos actuales que dan explicación de la dinámica interna. Debemos decir, sin embargo, que este primer modelo fue pieza fundamental para las posteriores explicaciones relacionadas con el movimiento de placas.

Todos estos descubrimientos mostraban indiscutiblemente que nuestro planeta no podía ser rígido, sino que debía estar fragmentado en muchas partes. Este análisis fue realizado por J. Tuzo Wilson, quien describió lo que actualmente se conoce como la *teoría de la tectónica de placas*, en donde mostraba que el planeta presenta una región llamada *litosfera* y se encuentra fracturada en muchos pedazos que son conocidos como *placas*. Las placas se mueven como una unidad, y es a partir de este modelo, que se puede explicar el mecanismo que crea como el que destruye litosfera y mantiene constante la cantidad de material que existe en el planeta, este mecanismo (el que destruye) es conocido como **subducción** y se genera en todo el planeta. A partir de entonces, se han generado nuevos modelos que explican el comportamiento terrestre y hacen que cada día comprendamos más el interior de nuestro planeta.

En la práctica, son las ciencias sociales las responsables del aprendizaje de temáticas relacionadas con el interior de la tierra. Si miramos el área específica en donde se aborda este tema, evidenciaremos que es la geografía, como una rama de las ciencias sociales, la encargada de realizar la enseñanza a los estudiantes en el aula de clases. Sin embargo, los procesos físicos implicados en comprender el interior terrestre, el movimiento de placas y el proceso de subducción, no son abordados desde allí, esto es algo curioso ya que, si vemos el recuento anterior, ha sido en gran parte gracias al entendimiento en física que se ha podido dar cuenta del interior terrestre para

⁴ Para mayor detalle relacionado con la inversión magnética, vea (Tarbuck & Lutgens, 2005 página 47).

la comprensión posterior de esos procesos ligados a la dinámica interna de nuestro planeta. Por eso se plantea la siguiente pregunta: **¿Cómo abordar los estudios sobre la tectónica de placas y los procesos de subducción para generar procesos de enseñanza a partir de actividades experimentales?**

Como la principal idea de este trabajo es abordar la temática del movimiento de placas y en especial de la subducción desde una perspectiva física, esta actividad tiene como intención que se desarrolle en el aula de clases con los estudiantes de grado 11C del colegio Champagnat. Así, a través del diseño de actividades para esta población, se plantea la pregunta de investigación en el aula: **¿Cuáles son las descripciones que hacen los estudiantes de grado 11 C del colegio Champagnat cuando discuten los modelos de subducción?**

Para responder a esa pregunta tenemos un **objetivo general**, el cual es: **Analizar las descripciones y discusiones realizadas por los estudiantes de grado 11C del colegio Champagnat de Bogotá sobre la tectónica de placas y el proceso de subducción a partir de la actividad experimental.**

Para alcanzar esta meta, se debe alcanzar **4 objetivos específicos** que son:

1. Caracterizar los diferentes tipos de convección implicados en el movimiento de placas tectónicas de la tierra.
2. Identificar el proceso de subducción que se lleva a cabo en el hundimiento de placas tectónicas.
3. Desarrollar actividades experimentales para producir el fenómeno de convección y subducción
4. Implementar la actividad experimental en el aula para la comprensión de los mecanismos que hacen posible la discusión sobre el proceso de subducción.

Nótese que los 3 primeros objetivos ayudan también a responder cómo abordar estos estudios. Para alcanzar el objetivo general, se ha diseñado este trabajo en torno a 3 capítulos en donde se muestra toda la estructura teórica necesaria para la comprensión de los problemas ligados al interior terrestre y la subducción y también un capítulo en donde se propone 2 actividades experimentales con el fin que la población, al realizar la actividad(en este caso estudiantes de bachillerato) puedan generar discusiones en torno a esos modelos y así vincular los fenómenos terrestres, como parte integral en su proceso de formación estudiantil.

Comenzamos este estudio en el capítulo 1, en donde el punto de partida es la convección porque a mi criterio, es la mejor forma de comprender los fenómenos internos de nuestro planeta, los movimientos de placas, o mejor dicho, la tectónica en general, están basadas en la fuente de calor producida en el interior, los modelos de convección son clave para comprender no solo las primeras teorías relacionadas con el movimiento de placas, sino también para entender cómo los nuevos modelos dan cuenta de la dinámica interna terrestre, entender cómo funciona, de qué depende y explicar la función de las celdas convectivas, hacen parte de este capítulo.

Nuestro capítulo 2, abordará en detalle todo lo relacionado al proceso de subducción, su naturaleza, las formas en cómo se produce y los lugares donde el mecanismo funciona, además mostraremos como la subducción está relacionada con la convección y este mecanismo(subducción), nos da herramientas para comprender la dinámica interna terrestre.

El capítulo 3 se aborda los modelos propuestos para la comprensión de la actividad convectiva que hace posible el movimiento de placas, aquí se presentan el primer modelo de explicación en torno al movimiento de placas (antiguo modelo) y después de muestran nuevos modelos para así compararlos. Una vez comprendido pasamos a mostrar la idea de modelización que será clave para la implementación en el aula de las actividades diseñadas en torno a la comprensión del movimiento de placas, específicamente, el proceso de subducción.

En el capítulo 4, se presenta la propuesta de aula para los estudiantes, para eso se presentan dos modelos experimentales para aproximar al estudiante a la comprensión del modelo interno del planeta y así generar discusiones en torno al modelo de subducción terrestre, para esto nuestro trabajo se basa en tres ejes o momentos, los dos primeros relacionados con la actividad experimental y un tercer momento vinculado con la discusión de la estructura interna terrestre. Se proponen guías de trabajo en grupos para resolver las preguntas propuestas y a partir de allí se hagan análisis que vinculen la actividad con el interior terrestre.

Por último, presentamos el capítulo 5 en donde primero, Se vincularán todas las ideas y se verá si las actividades tuvieron efecto en la comprensión y discusión de la subducción en la Tierra. De todo esto, finalmente, se hará una conclusión sobre lo trabajado por los grupos para así concluir (valga la redundancia) la actividad propuesta en este trabajo de grado.

1 Los fenómenos de convección y su relación con el interior terrestre.

El planeta Tierra, que conforma uno de los 5 planetas rocosos en nuestro sistema solar, presenta una dinámica interna. La explicación que existe para esta dinámica es, en principio, debido a la actividad térmica que se produce en una zona bien definida de nuestro planeta conocida como *manto*. Esta actividad térmica hace que existan los mecanismos que son clave para la comprensión y estudio de los diferentes procesos que son registrados en nuestro planeta.

1.1 El planeta y sus mecanismos de transferencia de calor.

Islandia, es un país ubicado al norte de Gran Bretaña y cerca de una de las islas más grandes del mundo, Groenlandia. Este país es conocido no solo por su gran atractivo turístico, sino también por su gran actividad geológica que hace posible el estudio de muchos fenómenos relacionados con el interior terrestre. Uno de esos fenómenos son los majestuosos géiseres, estos son zonas de antigua actividad volcánica en donde se encuentran yacimientos de agua a muy altas temperaturas. La característica principal de un géiser es la expulsión de agua hacia la superficie como si de un volcán se tratase⁵. ¿Cómo es posible que el agua expulsada tenga temperaturas tan elevadas?

Figura 1. Expulsión de agua a través de un Géiser.



Nota: Géiser Strokkur en Islandia, el agua entra en ebullición y, debido al aumento de la presión existente en el interior del géiser, el agua sale expulsada con una gran temperatura, el agua se filtra y regresa al fondo y se repite el ciclo. Tomado de: [Qué es un géiser y cuál es el más impresionante del mundo \(eluniversal.com.mx\)](https://eluniversal.com.mx) por Zannie, 2020.

esto es debido principalmente al magma ubicado en el interior terrestre, este transfiere el calor a las rocas y a su vez, las rocas lo transfieren al agua, esta transferencia de calor aumenta la temperatura del agua y hace que salga expulsada del géiser, según la fundación aque:

“la presión del agua caliente rompe la tensión superficial y explosiona saliendo fuera del géiser en forma de chorro”

mostrándonos uno de los mayores espectáculos de la naturaleza.

Pero esta transferencia de calor es algo que ocurre no solo en los géiseres, en general, ocurre en todo el interior de la Tierra porque nuestro planeta internamente presenta grandes temperaturas

⁵ No solo en Islandia se presentan los géiseres, en países como Chile, Australia o Estados Unidos también existen, en este último está el parque nacional de Yellowstone donde se encuentra el géiser más grande del mundo.

algunas de las cuales ¡pueden ser iguales a las de la superficie del sol! eso implica que el calor existente allí es muy grande y va transfiriéndose a los materiales que están en el interior hasta llegar a puntos como los géiseres, dándonos como resultado esos grandes chorros de agua.

Esas grandes temperaturas de nuestro planeta presentan variaciones que dependen de la profundidad, dicha variación se le conoce como *gradiente geotérmico* (Tarbuck & Lutgens, 2005). Como la Tierra no está compuesta de un solo elemento sino de diversos materiales en su interior⁶, las distribuciones de temperatura serán diferentes porque la transferencia de calor entre estos materiales dependerá no solo de la profundidad sino también del material mismo, esta transferencia dada por el contacto entre los materiales es lo que se conoce como *conducción* y se presenta en todo el interior de nuestro planeta. Evidentemente si hacemos esta afirmación, deducimos de inmediato que nuestro planeta presenta una fuente de calor que permite el proceso conductivo, ¿dónde está esa fuente?, se encuentra en una de las capas de la Tierra, el manto, que presenta un tamaño aproximado de 2900km. Por supuesto, esa transferencia a su vez dependerá de otras variables como el área de contacto entre ellas y hasta la dirección del flujo térmico (Martín Domingo, 2011).

Pero no solo este mecanismo existe en el interior terrestre; en el párrafo anterior mencionamos que la fuente de calor interna se encuentra en el manto, este calor es explicado por la desintegración de elementos como el uranio o el potasio (Bercovici & Ricard, 2000), esta desintegración libera energía y a su vez es la que genera el calor necesario para mantener con altas temperaturas el interior terrestre. La desintegración de estos elementos produce otro mecanismo de transferencia de calor llamado *radiación*, este mecanismo tiene la particularidad de que no necesita un medio para ser propagado a diferencia de la conducción y convección. Si observamos con claridad, nos daremos cuenta que nuestro planeta se encuentra en un estado de enfriamiento debido a que estos materiales no son eternos, llegará un punto en donde la desintegración no tendrá lugar y el interior del planeta terminará enfriándose teniendo como efecto final una dinámica nula del interior terrestre. Estos mecanismos, junto con el fenómeno de convección como actor principal, hacen parte activa del movimiento interno de nuestro planeta.

⁶ En el anexo número 1 titulado *las capas de la Tierra*, se profundiza sobre esta cuestión.

1.2 El fenómeno de convección y su relación con el interior terrestre.

Actualmente, las teorías relacionadas con el movimiento interno del planeta son explicadas en principio, a través de dos mecanismos, la convección interna generada en el manto y la fuerza gravitacional (Alfaro et al,2013). En el siguiente capítulo tendremos en cuenta la gravitación, importante para el fenómeno de subducción. Así que aquí hablaremos sobre la *convección* que, como mecanismo de transferencia de calor, hace posible (junto con la fuerza gravitacional) el movimiento de las placas tectónicas de nuestro planeta. Una pregunta interesante que surge es sobre esa convección que existe en el interior terrestre, ¿cómo sabemos que existe convección si nadie ha ido allí? y ¿cuál es la relación que existe entre la convección y las placas tectónicas? Para responder las preguntas debemos entender qué es la convección, cuál es su mecanismo y cómo se da éste, una vez comprendido, podremos ver cómo se llegan a las teorías sobre la convección en el interior de nuestro planeta y así tendremos mayor claridad en cuanto al movimiento placas se refiere.

La convección, es un mecanismo de transferencia de calor que se da, ya sea por el movimiento de un fluido sobre una superficie sólida, o también por el movimiento entre fluidos diferentes debiendo haber evidentemente una fuente de calor externa. Esta definición es clave, ya que nos da una pista acerca de algunas propiedades físicas que debe (o debería) tener nuestro planeta para que exista este mecanismo de transferencia de calor. Como la convección necesita de un fluido, inferimos que, si existe la convección allí, nuestro planeta debería presentar alguna región con esta característica o por lo menos que se *comporte* como un fluido, en el capítulo siguiente mostraremos que esta región sí existe y es conocida como *astenosfera*, por ahora podemos decir que es allí el lugar en donde se mueven las placas tectónicas. Aunque la definición de la convección parezca sencilla en principio, el estudio de éste presenta ciertas dificultades debido a que depende de muchos parámetros. Experimentalmente se ha demostrado que la convección depende tanto del fluido como de sus propiedades(densidad, capacidad calorífica etc.) además, si la convección se da entre un fluido con un objeto, entonces este también afectará la convección, ¿por qué? porque el objeto presenta una superficie y, cuando las corrientes pasan por esa superficie, los patrones convectivos cambian, en general, la convección depende de la superficie del objeto, de la orientación que tenga este en el espacio y ¡hasta de cuán pulida esté la superficie! esto es así debido que cuando se presenta la convección, como su definición misma nos indica, debe existir movimiento de fluidos, esto implica transferencias de masas fluidas, por tanto

la velocidad con que fluya, la viscosidad y la temperatura harán que varíe el proceso. Todas estas relaciones pueden verse por medio de varios números adimensionales que nos caracterizan la transferencia de calor y nos muestran precisamente esa conexión existente entre las variables implicadas allí. Uno de estos números es el llamado *número de Nusselt* que se define de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{\bar{h}L}{\lambda}$$

Donde λ es la conductividad térmica del material, L representa una longitud que puede ser por ejemplo, el diámetro de un cilindro o el lado de una placa (Domingo, 2011), y $\bar{h}$ es el coeficiente de convección promedio de una superficie, promedio porque la convección como tal no es la misma a lo largo de una superficie por tanto:

$$\bar{h} = \frac{1}{S} \int_S h dS$$

Según (Domingo, 2011) “el número de Nusselt es una medida de la relación entre las tasas de transferencia de calor por convección y por conducción en un fluido”.

Ahora, los fluidos presentan una viscosidad, y esa viscosidad determina a fin de cuentas la manera en cómo fluye este sobre un medio, si esto es así, la convección sí debe ser afectada por la viscosidad porque, como mencionamos anteriormente, se realiza por el movimiento de fluidos, si el fluido es laminar o turbulento, entonces hará que la convección varíe, el número que determina este comportamiento de los fluidos es el *número de Reynolds*

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Aquí ρ es la densidad del fluido, L la longitud de la placa y μ la viscosidad del fluido. Esto es importante en la convección ya que ella se presenta de dos maneras. Tenemos la convección natural, y se dice natural porque ocurre por las fuerzas de flotación producto de las diferencias de densidades dadas entre el fluido de mayor temperatura y el de menor temperatura, imagine un plato de sopa caliente, ese vapor asciende libremente sin necesidad de un medio exterior. También se presenta la convección forzada, aquí la convección se da debido a un agente externo, por ejemplo, un ventilador. Es importante diferenciarlos porque los números mencionados anteriormente se

modificarán si la convección es natural o forzada. En la convección forzada aparece un valor adimensional que determina la razón entre la viscosidad dinámica ν y la difusividad térmica α y es conocido como *número de Prandtl* Pr

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

En la convección natural también aparece una variable adimensional que depende del cubo de la longitud, la diferencia de temperatura entre un par de superficies, la gravedad y la dilatación volumétrica conocida como *número de Grashoff* Gr

$$Gr = \frac{g\alpha_v\Delta TL^3}{\nu^2}$$

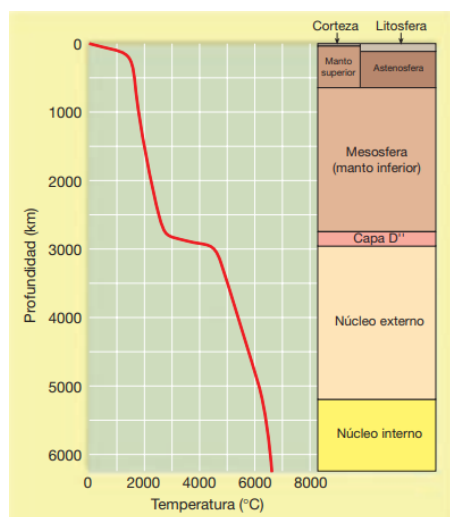
Aunque es una lista de variables, estas son de utilidad porque ellos permiten caracterizar el fenómeno convectivo, ya veremos cómo se relacionan estas variables con el interior terrestre, por ahora podemos decir sin temor a equivocarnos, que la convección es uno de los mecanismos de transferencia más difíciles de estudiar debido a la cantidad de variables implicadas.

Debemos estar de acuerdo que es imposible para los seres humanos viajar a regiones tan profundas de nuestro planeta como el manto⁷ (lugar en donde se genera la convección) para tomar una muestra directa y verificar la existencia de esta convección (por no mencionar siquiera al núcleo), pero si esto es así, ¿quién nos garantiza que existe la convección en el interior de nuestro planeta? Si lo ponemos de esa manera, evidentemente no hay una respuesta directa porque no se ha llegado allí, pero eso no significa que no se pueda determinar la existencia de dicho fenómeno, Inge Lehmann demostró que existe una diferencia entre el núcleo externo (líquido) y el interno (sólido) a partir del estudio de las ondas⁸. Ese núcleo externo, con esa fuente de calor, debe poder distribuirse a lo largo del interior terrestre, ¿cómo? A través de la convección porque existe el fluido que está en movimiento junto con la parte sólida del planeta, vemos entonces que la convección sí existe allí, lo que no se sabe con certeza realmente es la naturaleza de esa corriente convectiva (Tarbuck & Lutgens, 2005) hay varios modelos (en el capítulo 3 lo abordaremos)

⁷ Pero esto no significa que no se haya intentado, la U.R.S.S lo intentó perforando un pozo que se conoce como pozo superprofundo de Kola, sin embargo, no alcanzaron ni el 1% de profundidad.

⁸ Mirar Anexos.

Figura 2. Gradiente Geotérmico del Planeta



Nota: A medida que la profundidad aumenta la temperatura también lo hace, adicionalmente podemos observar que este aumento de temperatura no es lineal, esto debido tanto a las diferentes condiciones de presión como de materiales en las diferentes capas del planeta. Tomado de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* (p.123) por Tarbuck & Lutgens, 2005, PearsonPrenticeHall.

Lo que sí podemos saber es precisamente la existencia de ese gradiente geotérmico, lo podemos ver en las actividades volcánicas (el magma de las profundidades) o incluso en las minas profundas. Este gradiente es medido por medio de la actividad sísmica o por medio de herramientas informáticas como la tomografía sísmica, cuyo objetivo es la reconstrucción del interior terrestre a partir de las ondas, de esa misma manera también se descubre que el interior de la Tierra presenta ciertas características específicas dependiendo de la profundidad, zonas en donde está compuesto por materiales que se comportan como fluidos o centro mismo del planeta que es sólido (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Ahora, si las ondas⁹ determinan que existe calor allí, debe haber alguna manera de mostrar que existe convección, de hecho, la hay. La forma de caracterizar la existencia transferencia de calor, ya sea por conducción o convección, es por medio de una variable conocida como el número de Rayleigh Ra , según (Domingo, 2011) este número es el resultado del producto dado entre el número de Grashoff y el número de Prandtl de la siguiente manera:

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Vemos que este número depende muchos parámetros que son, la temperatura, la difusividad térmica, la viscosidad del fluido, la densidad del fluido la expansión térmica y hasta del grosor de la placa (Bercovici & Ricard, 2000). Ahora, según (Bercovici & Ricard, 2000) si $Ra > 10^3$, entonces habrá convección. Todas las mediciones realizadas por estos medios (actividad sísmica, tomografía, reología etc.) han determinado que el manto terrestre está en el orden aproximado de $10^7 < Ra < 10^9$ mostrando la naturaleza convectiva y además nos dice algo adicional y es que el manto presenta una alta viscosidad, esto debe ser así porque los materiales más pesados se encuentran más cerca del núcleo, al estar sometidos a condiciones tan extremas de temperatura y

⁹ Son las ondas P y las ondas S, para mayor detalle, mirar en los anexos.

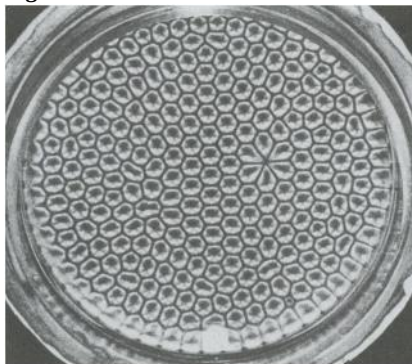
presión cambian sus propiedades y quizás tienda a fluir debido al proceso convectivo existente allí, como vemos, el planeta presenta propiedades térmicas importantes que serán clave para las teorías relacionadas con el movimiento tectónico general.

1.3 La convección de Rayleigh-Bénard.

Cuando un fluido es confinado entre un par de placas que se encuentran a diferentes temperaturas y separadas a una distancia tal que exista intercambio de calor entre ambas, entonces el fluido presentará *inestabilidad*, es decir, una convección. La condición es que la placa inferior presente mayor temperatura que la placa superior porque al estar a mayor temperatura, las partículas del fluido ascenderán debido a que disminuyen su densidad. Al entrar en contacto con la superficie fría, este desciende hasta la placa caliente y repiten el ciclo, o sea, se ha formado una celda de convección. Si lo vemos desde el punto de vista de los gradientes geotérmicos, este (el gradiente) debe ir en aumento para que dicho suceso ocurra, esto es igual a lo que sucede en el interior de nuestro planeta porque como se vio anteriormente, el gradiente geotérmico de nuestro planeta aumenta conforme aumenta la profundidad, esto hace pensar que internamente nuestro planeta debe presentar también un patrón convectivo por lo menos, con características algo similares a lo mencionado aquí.

Al tener estas condiciones, el fluido presenta patrones geométricos regulares, uno de ellos el hexágono, sin embargo, a medida que aumenta este gradiente, el patrón cambia y se vuelve más irregular. El primero en estudiar este fenómeno fue el físico francés Henry Bénard a través del aceite que era extraído de las ballenas (conocido como espermaceti) (Bercovici, 2007) para verlo observemos la figura 3

Figura 3. Celdas de Convección.

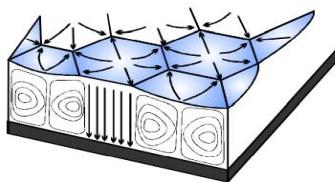


Nota: patrones regulares formados por la diferencia de temperaturas entre las capas de fluido. Tomado de: *Inestabilidades térmicas: Célula de Bénard* por Basterrechea, 2015 (p.7) Universidad del país Vasco.

¿De qué dependen los patrones presentados en la convección de Rayleigh- Bénard? Cuando Bénard realizó su experimento, el fluido presentaba una profundidad de 1mm y la diferencia de temperaturas de las placas era de 80°C (Basterrechea, 2015). Uno de los primeros en explicarlos fue el científico John William Strud mejor conocido como Lord Rayleigh ya que, según (Vilte et al, 2005) “desarrolló una teoría que permitía explicar los mecanismos físicos que producen la convección,

aunque no permitía explicar los detalles de lo observado por Bénard” esa teoría física está relacionada principalmente con el arrastre y la difusividad térmica del fluido, un fluido viscoso tendrá efectos diferentes con un fluido que presente menor viscosidad. Una mayor viscosidad tiene como efecto un mayor arrastre lo que implica a su vez que el fluido en ascenso, al calentarse, pierda energía de movimiento, además el fluido presenta cierta difusividad térmica, entonces la temperatura de este disminuye haciendo que ya no sea la suficiente para producir el fenómeno. Hay tres variables en juego que me determinan ese comportamiento: la fuerza de flotación, la fuerza ejercida por la viscosidad(el arrastre) y la difusividad térmica, todo esto puede ser descrito a través del número de Rayleigh R_a del que ya hemos mencionado con anterioridad. Según (Bercovici,2000) existirá convección, si R_a supera cierto valor crítico que, como mencionamos en el apartado anterior, es equivalente a 10^3 , esto implica que las fuerzas de flotación serán mayores que las fuerzas producidas por el arrastre viscoso del fluido, esto es importante porque corrobora la idea acerca de la convección en el manto, los materiales más densos se hunden por la acción gravitatoria y los menos densos suben debido a esa flotabilidad dada por las grandes temperaturas existentes allí, como esto es en una pequeña porción del fluido, al extenderlo a toda la placa obtendremos una diversidad de patrones de convección, muchas ramas de esas celdas suben por la flotabilidad y se hunden cuando esas fuerzas de flotación son menores que el arrastre y la gravedad, además también influye la disminución de su temperatura. Mientras haya una fuente de calor, este proceso se repetirá indefinidamente.

Figura 4. *Patrones Convectivos en una Placa*



Nota: El fluido en una fuente de calor genera celdas de convección en el interior de la placa. Tomado de: *Convección de Bénard: Visualización del fenómeno y determinación de parámetros relevantes empleando un programa de cálculo* por Vilte et al, 2005, (p.2) Universidad Nacional de Salta.

Si imaginamos un objeto flotando encima del fluido, y si imaginamos que la celda convectiva presenta la suficiente fuerza de arrastre, entonces esta movería el objeto en la dirección a la cual se mueve la celda, mientras exista fuente de calor, el objeto será desplazado a través de la celda hasta

el lugar en donde una de las ramas de la celda se hunde para comenzar el ciclo, pues este fue el primer modelo propuesto para explicar la naturaleza del movimiento dada por las placas de nuestro planeta, en el capítulo 3 veremos que no solo la convección sino otros factores son los responsables de la dinámica interna terrestre.

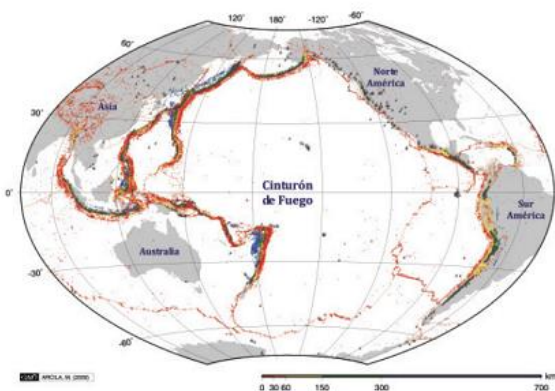
2 El interior terrestre, su descripción y movimiento interno.

Este capítulo está centrado en un proceso geológico de gran importancia llamado subducción, importante para la comprensión de muchos otros fenómenos del interior terrestre que, en su conjunto, nos dan cuenta de gran variedad de procesos en nuestro mundo como los son: los terremotos, el surgimiento de las islas volcánicas y cordilleras. ¿qué es la subducción? ¿cuál es su importancia?, comprender esto nos dará herramientas necesarias para poder entender las nuevas teorías relacionadas con el movimiento interno terrestre y también nos dará una mayor visión sobre cómo se entiende uno de los tres procesos geológicos existentes en el planeta y cómo este afecta, tanto de manera directa como indirecta a todos los seres humanos.

2.1 La subducción como proceso geológico terrestre.

El 26 de diciembre del año 2004, en el océano Índico, cerca del país de Indonesia, se presentó uno de los mayores acontecimientos registrados desde comienzos del siglo XX, un terremoto de magnitudes tan grandes que sus olas llegaron a países tan alejados como Kenia o las islas Seychelles. Esto fue ocasionado por la tensión existente dada en la corteza del interior terrestre,

Figura 5. Cinturón de Fuego del Pacífico



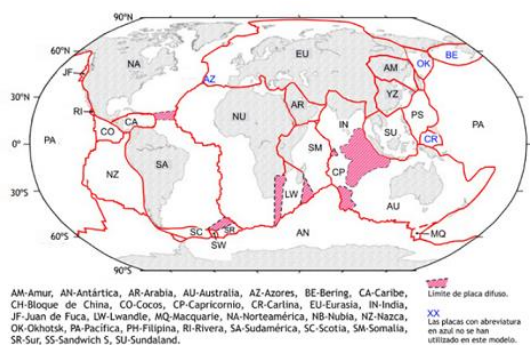
Nota: Mapa del océano pacífico en donde muestra gran actividad sísmica (el color indica la profundidad del sismo) Tomada de: Ingeominas y la Red Sismológica Nacional de Colombia: quince años estudiando la sismicidad del país. Por Arcila, 2004 (p.5) Revista del Instituto Colombiano de Geología Y Minería.

la energía liberada en el acontecimiento fue tan grande que ocasionaron tsunamis produciendo muertes en el país de Indonesia y grandes daños materiales (González & Figueras, 2005).

Se sabe que en el pacífico existe una zona de gran actividad sísmica conocida como el *cinturón de fuego del pacífico*, allí toda esa actividad sísmica es muy frecuente y se tienen registros de destrucciones como el ocurrido en Chile

en el año de 1960, o por ejemplo los desastres ocurridos en el país nipón o los sismos que ocurren en torno a lo que mundialmente se conoce como la falla de San Andrés, toda esta tendencia de actividad sísmica la podemos observar con claridad en la Figura 5.

Figura 6. Las diferentes Capas de la Tierra.



Nota: Todas las placas que conforman el planeta, dependiendo el lugar de estudio de la placa, podremos tener diferentes interacciones entre las mismas, este modelo la gran mayoría de fenómenos físico-geológicos de nuestro planeta. Tomada de: *La Tectónica de Placas, Teoría Integradora sobre el Funcionamiento del Planeta*. Por Alfaro et al. 2013 (p.170) Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra.

Todo esto es posible debido a que nuestro planeta está fragmentado en pedazos conocidos como placas como vemos en la figura 6. La actividad sísmica, los tsunamis etc. Son producto del movimiento de estas placas cuya fuente de energía que permite dicho movimiento proviene del interior terrestre. Lo siguiente es preguntarse cómo es la interacción entre las placas porque, si las placas se mueven unas con respecto a otras, entonces ellas deben interactuar a través de la unión dada entre placa y placa, por tanto, deben interactuar a través de sus *bordes*. Si las placas se mueven de manera lateral una con respecto a otra sin producir aumento o disminución de su tamaño, entonces nos encontramos ante lo que se conoce como *movimiento transformante* o de *cizalla*. Cuando las placas se separan unas de otras, tendremos afloramiento de manto porque asciende material desde el interior terrestre y los bordes en los cuales las placas estaban interactuando son conocidos como *bordes divergentes* precisamente porque las placas, al crear nuevo material, se separan entre sí. Si los bordes de las placas chocan entre sí y se produce hundimiento de una placa por debajo de la otra (se reduce la placa debido a esa interacción), entonces la interacción es a través de *bordes convergentes* y el fenómeno ocurrido en esta interacción es el **fenómeno de subducción**. La teoría que estudia todas estas relaciones es conocida como *teoría de la tectónica de placas* (Stern, 2018). En la figura 7 podemos observar los tipos de bordes existentes que han

sido registradas a través de la actividad sísmica y a través de las dorsales oceánicas (Alfaro et al. 2013).

Figura 7. Bordes de Placa y su Comportamiento



Nota: Los tres tipos de bordes interactuando a lo largo del planeta, vemos que los bordes convergentes las placas se acercan, los divergentes se expanden y los transformantes se mueven lateralmente uno con respecto al otro. Tomado de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* (p.53) por Tarbuck & Lutgens, 2005, PearsonPrenticeHall.

Esta teoría permite dar explicaciones acerca de muchos de los fenómenos existentes en nuestro planeta como los terremotos, la formación de montañas o hasta las erupciones volcánicas. Naturalmente, al ver esta teoría, nos preguntamos: ¿cómo saben los científicos (geólogos, geofísicos etc.), que realmente nuestro planeta se encuentra fragmentado?, ¿Cómo se organizan estos conocimientos?, esto se ha demostrado de varias formas, una de ellas está relacionada con los sondeos que se hacen en las profundidades marinas estudiando la edad del sedimento del fondo oceánico, entre más cerca esté de una dorsal, más joven será el sedimento encontrado debido a que las placas se expanden al aflorar de la corteza y esta trae nuevo material desde el interior del planeta (Tarbuck & Lutgens, 2005),

la actividad sísmica también ha sido clave, no solo para determinar los límites de las placas, sino para determinar la estructura en forma de capas que presenta la Tierra y otro está relacionado el paleomagnetismo (rocas que contienen registro de la dirección de los cambios de magnetismo ocurridos en nuestro planeta)¹⁰ porque estas guardan la información magnética del planeta y, dependiendo la distancia en donde se encuentren respecto a la dorsal, determinará cuán rápido se mueven las placas .

El modelo de placas tectónicas se hace indispensable al momento de comprender cómo interactúan las placas entre sí. Como internamente nuestro planeta es un lugar dinámico debido a los procesos que ocurren en su interior (Fernandez et al. 2016), entonces esa dinámica (dada por la convección) hará que la placa se mueva en varias direcciones porque la convección puede variar de un lugar a

¹⁰ Para una explicación detallada de las pruebas que confirman la tectónica de placas y la estructura interna de la Tierra, mirar en los anexos.

otro debido a que, como se mencionó en el capítulo anterior, depende del material y las características del medio.

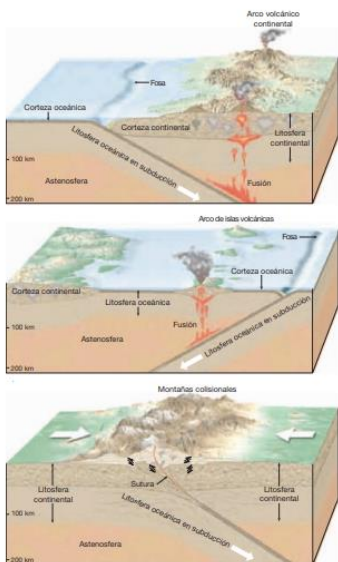
2.2 La subducción, interacción que se da entre bordes convergentes.

Cuando observamos esa interacción de las placas como los mostrados en la Figura 7, intuimos inmediatamente la interacción física que se presenta (mecánica, térmica etc.), claramente, estas interacciones deben darse tanto en el océano como en las regiones continentales del planeta. Por tanto, cuando se presenta el fenómeno de subducción, las interacciones entre esos bordes convergentes pueden darse en tres formas:

1. Puede ocurrir que uno de los bordes esté en la corteza continental y otro en la corteza oceánica como por ejemplo la placa de Nazca y la Sudamericana, en cuyo caso la interacción será continental-oceánica.
2. También está el caso en el cual dos bordes oceánicos interactúan entre sí en cuyo caso tendremos una interacción de tipo oceánica-oceánica.
3. Por último, podemos tener dos bordes continentales interactuando entre sí, evidentemente esta interacción es conocida como de tipo continental-continental.

Todo esto lo podemos observar a través de la figura 8

Figura 8 *Convergencia de Placas*



Es decir, la interacción física que se da, modifica las placas y, dependiendo la región en donde interactúen, presentarán efectos mecánicos diversos sobre las otras (tracción, tensión etc.), o térmicos (dilatación, transferencia de calor etc.), a su vez esto tendrá otras variables en juego como la fricción entre ellas y el desgaste mismo que modifique tanto el tamaño como la velocidad a la cual se mueven las placas (Gutiérrez-Alonso et al. 2019).

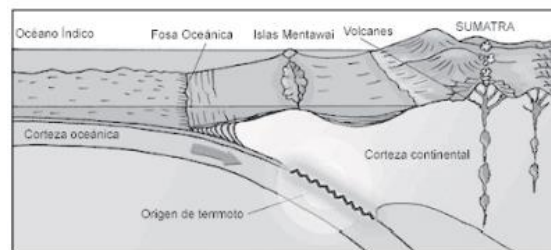
Pensaríamos inmediatamente que, si hay un desgaste, las placas terminarían por desaparecer (o por lo menos reducir considerablemente su tamaño), presentándose a su vez un

Nota: Los diferentes bordes presentan efectos diferentes en el fenómeno de subducción, de arriba abajo tenemos: C-O; O-O; C-C, cuyos resultados son la creación de volcanes, islas oceánicas volcánicas y cordilleras respectivamente. Tomado de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*, por Tarbuck & Lutgens, 2005 (p.59) PearsonPrenticeHall.

problema más grave y es la conservación de la masa, ésta nos dice que la masa debe permanecer igual en un proceso, esto no ocurriría si el planeta simplemente tuviese interacción de forma convergente es decir, que destruya la placa cuando interactúa, por tanto nuestro planeta también debería tener un mecanismo por el cual generara nueva corteza y así la cantidad de masa se conservaría, ese proceso se da entre *bordes divergentes* que se encuentran en los océanos y son los responsables tanto de la nueva creación de corteza como de las dorsales oceánicas del planeta (Tarbuck & Lutgens, 2005) ese proceso se le conoce como afloramiento de manto que fue mencionado al principio del capítulo. Si hay bordes divergentes, entonces también habrá bordes convergentes, manteniendo así el equilibrio másico de nuestro planeta.

Ya visto los tipos de interacción que hay entre los bordes convergentes de las placas, ahora veamos físicamente que sucede en el proceso de subducción. Para eso retomemos el caso del terremoto ocurrido en Indonesia en el año 2004 expuesto al inicio del capítulo, éste se debió a la interacción existente entre dos placas tectónicas, la India y la Birmana, la placa India se hundió por debajo de la placa Birmana y, la tensión acumulada en las placas debido al esfuerzo existente entre ambas, hizo

Figura 9. Subducción de Placas



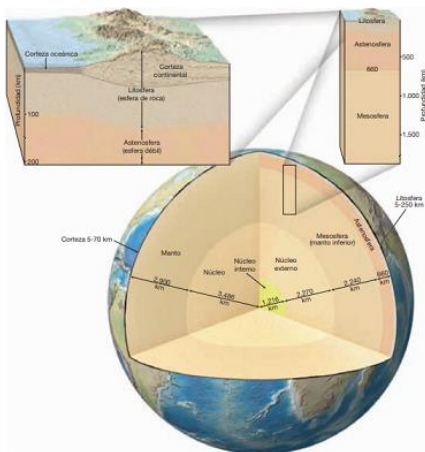
Nota: La tensión tan grande que existía en las dos placas se liberó ocasionando el tsunami del 2004 en Tailandia, observe que, para que exista esto, debe haber fuerzas enormes acumuladas entre ambas placas. Tomada de: *El tsunami de Sumatra del 26 de diciembre de 2004* por González & Figueras, 2005, (p.3) Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

que, al liberarse la energía, ocurriera tan desastroso evento (González & Figueras, 2005). Aquí la interacción se da entre la corteza oceánica y la corteza continental, como es la placa India la que se hunde por debajo de la Birmana, deducimos inmediatamente que la placa India es más densa que la Birmana Figura 9. Vemos además, que debemos tener en cuenta otros factores que son claves para la comprensión del proceso de subducción, es decir, si una placa se está hundiendo debajo de otra, significa que debe existir una fuerza lo suficientemente grande no solo para hundir,

sino para “doblar” la placa y hacer que subduzca por debajo de otra, esta fuerza es llamada *tirón de placa* aunque en muchos textos la encontraremos como *slab pull*.

La fuerza implicada va a depender tanto de la viscosidad como de la longitud de la placa, de la difusividad térmica y hasta del volumen que tenga (Bercovici & Ricard, 2000). Dada estas dependencias, sería natural pensar sobre aquella fuerza capaz de mover las placas, estas deben ser increíblemente grandes y se necesitaría una enorme cantidad de energía para hacerlo, los estudios han demostrado que es una acción combinada de la gravedad y el calor interno existente en nuestro planeta¹¹ la responsable de dicho suceso (Fernández et al. 2016) . Haciendo un pequeño análisis nos damos cuenta que, si la placa es subducida (podríamos decir que se doblan para hacerlo), necesariamente debe existir un torque (muy grande) para que pueda realizar ese proceso y hacer ingresar la placa hacia el interior del planeta, el método por el cual se estudia este torque es el llamado *método de balance de torques* que depende no solo del movimiento de las placas, sino hasta del tamaño y hasta la rotación entre ellas (Summeren et al. 2012) y esto es importante resaltar al momento de la enseñanza de los fenómenos de subducción

Figura 10. Las Capas de la Tierra



Nota: La estructura interna del planeta en donde nos muestra las diferentes capas existentes, observe que la litosfera, lugar donde están ubicadas las placas, está encima de la astenosfera generando fricción y grandes presiones sobre la capa. Tomado de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* por Tarbuck & Lutgens, 2005 (p.17) PearsonPrenticeHall.

En general en los textos nos muestran una imagen bidimensional del fenómeno de subducción, como ejemplo tenemos nuevamente la figura 8, en donde se muestra así porque de esa forma nos permite simplificar el estudio del modelo. Sin embargo, debemos tener presente que las placas no solo presentan ese movimiento, que podríamos llamarlo traslacional, sino que ellas también presentan un giro al momento de ser subducidas, según (Alfaro et al, 2013) “cuando las placas tectónicas se desplazan, lo hacen siempre rotando alrededor de un eje”, vemos por tanto que la subducción realmente se estudia teniendo en cuenta estos movimientos. (en el capítulo siguiente haremos otra mención a esto).

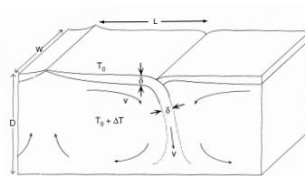
¹¹ La explicación de los modelos que explican la dinámica interna, serán estudiados a lo largo del capítulo 3.

2.3 La relación entre convección y subducción.

Ya mostrado cómo actúa la placa al momento de su hundimiento, nos queda una pregunta muy importante relacionada sobre el lugar en donde están las placas, es decir, ¿sobre qué está ubicada la placa?; la Tierra, aunque es un lugar homogéneo, internamente está conformado por capas como si de una cebolla se tratase y las placas se mueven a través de una de estas capas, para ser más específico, se mueve a través de lo que se conoce como astenosfera. Debemos aclarar que este conocimiento no se obtiene de manera directa propiamente dicha, es decir, no ha habido ninguna exploración hasta esos lugares de la Tierra, realmente lo mucho que se ha llegado ha sido a una profundidad máxima de 12km en el llamado proyecto superprofundo de Kola, si observamos la figura 9, nos daremos cuenta que ¡solo se ha alcanzado una profundidad equivalente al 0.1% del radio terrestre! tanto, el conocimiento adquirido ha sido a través de otros medios, uno de ellos y el más importante son las ondas sísmicas.

Ahora, debido a las grandes presiones existentes, esta capa de nuestro planeta se comporta como un fluido, pero no cualquier fluido, sino uno con una gran viscosidad (Bercovici & Ricard, 2000), esta capa puede observarse a través de la Figura 10. ¿qué sucede cuando la placa se hunde en estas capas?, se forman unas corrientes de tipo vertical, esto es así debido a que, aunque esta capa no es un fluido, la presión a la que está sometida hace que se comporta de esa manera, estas corrientes convectivas generan los flujos relacionados con el hundimiento de la placa

Figura 11. Flujo en el interior de la placa



Nota: El hundimiento de la placa produce pequeñas corrientes convectivas como se muestran en la figura, el arrastre producido en el interior terrestre y las fuerzas implicadas allí son responsables de este tipo de comportamiento. Tomado de: *The Relation Between Mantle Dynamics and Plate Tectonics: A Primer*. Por Bercovici & Ricard, 2000 (p.12) American Geophysical Union.

Generan pequeñas corrientes de convección Figura 11, aquí vemos claramente que el proceso debe depender de la longitud, grosor de la placa, su densidad y también de variables termodinámicas como la difusividad térmica o hasta la temperatura de la litosfera misma (Bercovici & Ricard, 2000). Todas estas variables hacen que el estudio de los procesos subductivos

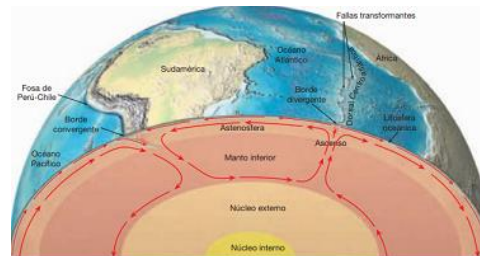
tengan una gran complejidad, sin embargo, debido a los avances en computación y nuevas tecnologías, se ha podido comprender el fenómeno y se han hecho modelos que simulan el movimiento interno de la placa y con esto podemos dar una imagen de cómo se comportan la placa en el proceso de hundimiento, a partir de allí podremos tener un mayor entendimiento acerca de los modelos actuales y además, acerca de ese motor capaz de dar movimiento a todas las placas tectónicas.

3 Modelos de placa, pasivo y activo.

3.1 Modelo Pasivo: Movimiento de placas por celdas convectivas de Rayleigh-Bénard.

En el capítulo 2, vimos todo lo relacionado al movimiento de las placas y específicamente, al fenómeno de subducción. Dentro de ese estudio vimos cómo se mueven las placas como una unidad con respecto a otras haciendo posible la comprensión de la convergencia entre las mismas. Sin embargo, cabe la siguiente pregunta que será clave, no solo para la comprensión del fenómeno, sino también para la enseñanza de los modelos actuales que dan explicación de la dinámica interna de la placa y es ¿cómo se explica el movimiento que tienen las placas tectónicas?, de decir su causa, ¿qué o quién produce el movimiento? la ayuda para dar respuesta a esta pregunta está en los grandes avances que se han dado en la geología, sismología, computación entre otros, porque éstas nos han dado brindado conocimiento acerca de la naturaleza interna de la tierra (aunque nunca hayamos llegado allí). Comencemos con la explicación “clásica” del fenómeno que, al momento de escribir esta tesis, sigue siendo enseñada y es aquella en donde las placas se mueven a través del planeta debido a celdas convectivas como si de una cinta transportadora se tratase.

Figura 12. *Modelo de Placa Pasivo*



Nota: Las placas se mueven a través de las celdas de convección y su dirección está dada por las flechas como si la celda arrastrara la placa hasta su hundimiento a través del borde convergente. Tomado de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* por Tarbuck & Lutgens, 2005 (p.46) PearsonPrenticeHall.

Cuando se intentó explicar por primera vez esta dinámica de placas que se daba como producto de la actividad convectiva interna terrestre, se dio explicación a través de un modelo basado en el arrastre de la placa producto de las celdas de convección que se creía, así eran como ellas se formaban en el interior terrestre, este modelo es conocido como el **modelo de Rayleigh-Bénard**. En principio, este mecanismo sería el más eficaz y el que mejor explicaría el por qué se mueven las placas, del capítulo 1 vimos cómo es el funcionamiento de este tipo de celdas convectivas. En la figura 12 podemos observar la manera cómo (desde el modelo pasivo) se explicó en principio la forma en como las celdas hacen que se mueven las placas. Al analizarla, nos

preguntarnos inmediatamente si estas corrientes tienen la fuerza suficiente para producir un arrastre de placa tan grandes y si este modelo explicaría otros procesos geofísicos que se dan también en el movimiento de placas. Como ejemplo de ello tenemos las velocidades a las que se mueven o la rotación que se da cuando cambian los tamaños de las placas debido al hundimiento o afloramiento de las mismas. En teoría, las corrientes sí que podrían mover las placas porque el tamaño de las celdas es lo suficientemente grande para hacerlo, las celdas mueven la astenosfera y esta a su vez la litosfera, lugar en donde “flotan” las placas, pero el mero movimiento no es suficiente, como se mencionó, también debe explicar otros sucesos relacionados con la dinámica de las placas.

Llegados a este punto podemos decir que la eficacia del modelo está dada fundamentalmente, por la “simplicidad” que presenta para describir el movimiento tectónico. Debemos ser claros, el concepto de simplicidad es mencionado porque este modelo de explicación, a diferencia de otros, sólo está basado en el movimiento de la celda. Las nuevas teorías (que veremos más adelante) tienen en cuenta más factores que hacen que en comparación, el modelo se vea “simple”. Ahora, una de las principales características de este modelo es que las placas no presentan un papel fundamental en el movimiento, sino que estas simplemente se muestran en forma pasiva (la acción entre placas sólo depende de la convección interna) en el movimiento general. Si debemos ser claros con el modelo de celdas, debemos recalcar que este ha sido completamente reemplazado (ni siquiera modificado) por la comunidad científica principalmente porque no solo la convección, sino la fuerza gravitatoria y la placa misma, juegan un papel importante en el movimiento y además son estas las que juegan un papel crucial para la dinámica interna terrestre (Alfaro et al. 2013). ¿por qué entonces es importante mostrar un proceso que ha sido o es prácticamente descartado?, en principio, cuando se propuso este modelo por Harry Hess (Tarbuck & Lutgens, 2005) se podía dar predicciones sobre la velocidad a la que se mueven las placas, además el modelo de celdas puede explicar (aproximadamente) los procesos que ocurren cuando se presenta hundimiento de placa, y también podemos añadir que este proceso, es esta imagen de nuestro planeta, la que se enseña de forma recurrente en las aulas, muchos trabajos se basan en este primer modelo para explicar la dinámica interna de nuestro planeta.

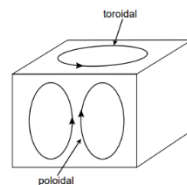
El modelo de celdas explica la velocidad a la que viajan las placas por año, si las placas se mueven, entonces la fuerza necesaria dependerá del peso de la placa y dependerá también de

variables como la temperatura y la densidad de la placa ya que es la celda la que suponemos, mueve la placa. Cuando se han hecho estudios para determinar la velocidad de la placa (sismología, reología, satelital etc.) se llega al resultado que las placas presentan una velocidad promedio de 10cm/año, el modelo de celdas puede explicar esto, (Bercovici & Ricard, 2000) nos muestra que, si la fuerza de flotabilidad que se ejerce sobre una placa es igual a la fuerza de stress necesaria para su hundimiento, entonces podemos obtener la velocidad de la misma, según los cálculos está dada de la siguiente manera:

$$v = \left[\left(\frac{\rho \alpha \Delta T g}{4\mu} \right)^2 L^3 \kappa \right]^{1/3}$$

Donde g es la gravedad, ρ es la densidad, μ es la viscosidad del fluido, L la longitud de la placa, ΔT es la temperatura por debajo de la placa formado por la diferencia de temperaturas dada en el interior terrestre con el hundimiento de placa y κ es una constante. La celda toma formas específicas de tipo vertical u horizontal, dependiendo del plano al cual esté orientado la corriente, si el ascenso es de tipo vertical, entonces tendremos una corriente de tipo *poloidal*, pero si la corriente se mueve de manera horizontal, entonces tendremos una corriente de tipo *toroidal*. Para verlo, observemos la figura 13

Figura 13. Orientación de los Fluidos en el Plano



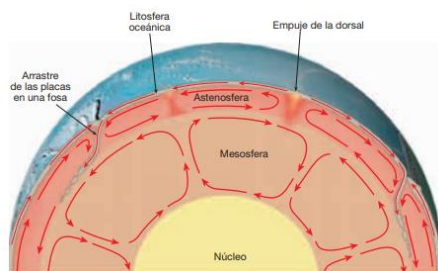
Nota: La orientación del fluido en el plano produce diferentes operaciones y diferentes formas de cálculo, ya que cada una presenta en el flujo convectivo diferentes propiedades. Tomado de: *The Relation Between Mantle Dynamics and Plate Tectonics: A Primer*. por Bercovici & Ricard, 2000 (p.11) American Geophysical Union.

Este tipo de corrientes se presenta cuando hay hundimiento de placa (subducción) independientemente del tipo de borde en el que interactúen. Para entenderlo, volvamos a observar la figura 8, vemos que se presentan grandes fuerzas debido al hundimiento de la placa que generan fricción y por ende calor. La capa externa (la que va a ser subducida), presenta menor temperatura que las primeras capas presentadas en el interior del planeta (las condiciones de presión y temperatura son mayores dentro del planeta), al subducirse la placa con esa temperatura inferior, se generan pequeñas corrientes convectivas en la astenosfera debido a la mecánica involucrada en el proceso de tracción de la placa, las corrientes deben ser como las mostradas en la figura 12 ya

que se presenta entre un sólido y un “fluido”, es decir, se presenta convección. Debemos tener presente, sin embargo, que con fluido hacemos referencia no a un fluido propiamente dicho, sino al comportamiento que presenta la placa en esas condiciones de presión y temperatura, a esa capa de la tierra que presenta dicho comportamiento es la ya conocida astenosfera, por debajo de eso, no se puede asegurar que el comportamiento sea similar debido a que las condiciones tanto de presión como de temperatura cambian haciendo que el estudio del mismo se vuelva tedioso. Aclaremos esta idea, el interior presenta una fuente de calor, pero los patrones derivados de esa fuente de calor no necesariamente deben seguir el tipo de movimiento presentado en la figura 12, el movimiento será deferente porque las capas presentan diversidad de materiales y el comportamiento de ellas variará con las condiciones de presión y temperaturas existentes allí.

Entonces, físicamente hablando, ¿qué hace que este modelo de placas presenta inconvenientes?, la respuesta a esta pregunta está en que, cualquier modelo propuesto para explicar el movimiento de placas, debe ser capaz de explicar, tanto las variaciones que ellas sufren (tamaño, velocidad, expansión etc.) como también de predecir cambios de movimiento en las mismas (Fernandez et al. 2016).

Figura 14. Modelo de estratificación a 660 kilómetros.



Nota: las placas se separan de la dorsal y generan pequeñas corrientes de convección, el núcleo genera calor y allí se forman celdas convectivas. Tomado de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* por Tarbuck & Lutgens, 2005 (p.72) PearsonPrenticeHall.

Localmente, el modelo sí predice algunos sucesos relacionados con el movimiento de placas, pero no da explicación acerca de la variabilidad de movimientos que presentan las placas ni de otros procesos implicados directamente con el movimiento como por ejemplo, la geometría y la rotación de las placas.

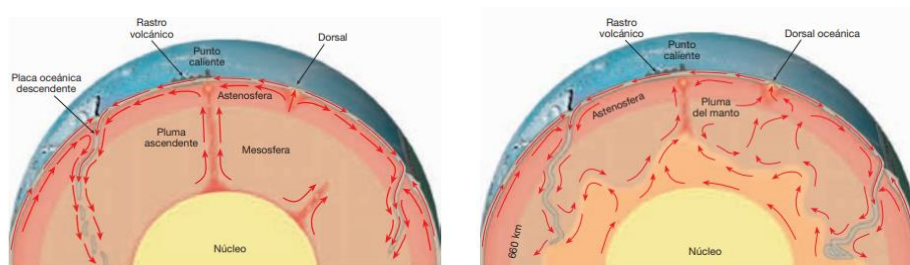
Uno de esos modelos propuestos por medio de celdas es el llamado *estratificación a 660 kilómetros*. En este modelo se presenta no sólo una, sino dos celdas y éstas están tanto en el

manto como en la astenosfera (Tarbuck & Lutgens, 2005) para verlo observe detalladamente la figura 14, allí puede observarse cómo este modelo de explicación podría dar cuenta de la dinámica interna terrestre, éste es conocido como *modelo activo* de placas ya que no solo la fuente de calor, sino la placa misma, hace parte esencial en el movimiento, esto lo detallaremos a continuación.

3.2 Modelo Activo: Movimiento tectónico por medio de la convección y tirón de placa.

Debemos enfatizar nuevamente que la convección sí existe, lo que no ocurre es que la convección solo produzca celdas del tipo Rayleigh-Bénard y sean estas las que arrastren la placa de manera lateral. En cambio, los modelos actuales no sólo incluyen a la convección, sino a la placa misma junto con la acción gravitatoria, como las responsables del movimiento tectónico general. Esos modelos actuales presentan una particularidad que hace comprender de manera diferente el estudio del movimiento tectónico. Las corrientes de convección **no** arrastran las placas, lo que realmente ocurre es que, son las placas las que se mueven y son estas las que controlan las corrientes de convección en el manto, la parte fría de la placa que es subducida y la parte caliente que aflora del interior terrestre genera la convección. Aquí debemos ser enfáticos en algo, el calor proviene del centro de la Tierra, se distribuye de manera desigual en el interior y genera convección, las placas modelan esas corrientes convectivas. Dos modelos adicionales propuestos para tal fin son: la convección de todo el manto y un modelo de capa profunda, cada uno de los modelos presenta ventajas con respecto al otro y también presentan ciertos inconvenientes, debemos recordar que son modelos aproximados que intentan dar explicación a un fenómeno del cual no podemos tomar muestras directas sino indirectas a través de las ondas sísmicas, tomografía etc. También hay modelos computarizados que presentan otras perspectivas de la convección interna, sin embargo, hasta la fecha no hay modelos que determinen con un 100 por ciento de confiabilidad, como son las corrientes de convección allí, pero los modelos ayudan a explicar fenómenos geológicos que han sido observado a través de la historia de esta ciencia

Figura 15. *Modelo de Convección de todo el Manto y Modelo de Convección de Capa Profunda*



Nota: La imagen de la izquierda corresponde a la convección de todo el manto, La subducción y el afloramiento del manto controlan las corrientes convectivas. La imagen de la derecha corresponde a convección de capa profunda que funciona como lámpara de lava.
Tomado de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* por Tarbuck & Lutgens, 2005 (p.72) PearsonPrenticeHall.

Si observamos la imagen, veremos inmediatamente la diferencia significativa que existe entre uno y otro, y vemos además que estos modelos varían considerablemente sobre el modelo de celdas propuestos para explicar el movimiento o la energía de movimiento que presentan las placas

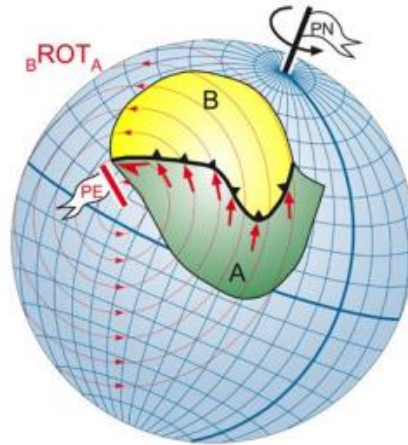
tectónicas. Aquí vemos que las placas son componentes activos en la tectónica porque son estas las que controlan (como dijimos anteriormente) las corrientes de convección del manto.

Algo importante a resaltar de estos modelos, es que también nos ayudan a cambiar la imagen clásica de subducción dada en dos dimensiones, los modelos que son propuestos para explicar la dinámica del manto, deben proporcionar también información sobre la rotación de las placas y cómo estas cambian con el tiempo, esto debe ser así porque cuando se presentó la imagen de Pangea, los continentes eran uno solo y después, con el pasar de las eras, llegaron a los lugares que conocemos hoy en día, eso solo es posible si existe una rotación entre ellas. Hemos mencionado con anterioridad que las placas presentan torques cuando se subducen entre ellas, ahora, ese torque es modelado a través de una matriz que contiene $3N \times 3N$ variables, estas N están relacionadas con las placas y el número tres hace referencias a las componentes vectoriales que representa el torque. Según (Summeren et al, 2012) la matriz presenta información sobre la geometría de las placas. Los elementos que se encuentren fuera de la diagonal de esta matriz representan las interacciones que tiene una placa sobre otro producto de la convección en el manto. El torque a su vez dependerá de la rotación presente en las placas que pueden ser evaluadas a través de los ángulos de Euler. Por tanto, si $\vec{Q}$ representa el torque, $\vec{\omega}$ la rotación y M la matriz, las variables se relacionan así:

$$\vec{Q} = M\vec{\omega}$$

Mostrándonos que la interacción de las placas presenta rotación y además depende de parámetros como viscosidad y arrastre, debemos recordar que las placas se encuentran en la astenosfera y esta presenta comportamiento plástico. La forma correcta de entender esta dinámica general de las placas es a través de modelos tridimensionales que tengan todas las variables mencionadas anteriormente. Para hacernos una idea de cómo funciona esto de la rotación entre placas, observe la figura 16, vemos que, al chocar, giran sobre un eje común, pero también se debe tener en cuenta, la traslación y el torque producido, así se obtiene una visión general de la dinámica entre placas.

Figura 16. Rotación de un par de Placas



Nota: Cuando dos placas interactúan, se producen rotaciones a través de un eje común a ambas placas, esa rotación junto con las características de la placa determina la fuerza que necesita para ser subducida. Tomado de: *La Tectónica de Placas, Teoría Integradora sobre el Funcionamiento del Planeta*. Por Alfaro et al, 2013 (p.171) Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

Vemos entonces que todos los modelos actuales que relacionen movimiento de placa, deben tener en cuenta todos estos parámetros. Los modelos tridimensionales ayudan no sólo en predecir la posición entre las placas sino también nos muestra a grandes rasgos, todos los sucesos que pueden ser descritos por la subducción. Mostrar los nuevos modelos y compararlos con los modelos clásicos de movimiento de placas, hace que tengamos claridad en sobre cómo funcionan y cómo estos modelos en la actualidad permiten dar detalles sobre el comportamiento interno de nuestro planeta.

3.1 La idea de modelación para su aplicación en el aula.

En este último capítulo vemos algo interesante y es de gran ayuda para la actividad en el aula de clases. Cuando se intenta dar a explicación acerca de la naturaleza convectiva del manto, se llegan a 3 *modelizaciones* para explicar y predecir esa convección interna. Cada uno de ellos presenta ciertas características específicas que permiten predecir cómo es el comportamiento convectivo en el interior terrestre, sin necesidad de ir allí, sino a partir de todas las pruebas que se han ido recopilando a lo largo del tiempo. Decimos entonces que esas modelizaciones han sido creadas para poder mejorar un modelo anterior que no ha dado explicación a ciertas observaciones, en este caso, al movimiento de placas, y así poder llegar a una comprensión y explicación más elaborada de los mecanismos que hacen posible el movimiento de placas. Aquí los científicos crean modelos

originales y abarcan un conglomerado de conocimientos y herramientas y llegan a un objetivo final, la predicción de un fenómeno.

En este trabajo, sin embargo, presentamos una idea sobre la modelización. Aquí nos basamos en las ideas propuesta por los autores Agustín Aduriz- Bravo y Mercè Izquierdo- Aymerich (Aduriz- Bravo & Izquierdo-Aymerich, 2009) del cual argumentan que la modelización “consiste en la construcción de argumentaciones en las que se *subsumen* los hechos científicos investigados bajo modelos disponibles que sean capaces de explicarlos o de dar cuenta de ellos.” Pero además nos muestran que la modelización “contiene también el ‘ejercicio’ intelectual de aplicar modelos ya existentes a explicar hechos ya estudiados en un entorno de enseñanza y formación.” (Aduriz- Bravo & Izquierdo-Aymerich, 2009) Vemos entonces, que existe una importancia en la construcción de representaciones que nos den cuenta del fenómeno o de un problema específico de las ciencias que sean significativas en el proceso de comprensión de los estudiantes, no necesariamente construir representaciones idénticas a las representaciones científicas que pueden además ser múltiples, aunque si vinculadas con aquello que los científicos hacen y organizan.

Podemos, por tanto, hacer que los estudiantes comprendan cómo se llega al conocimiento de fenómenos específicos por medio de la construcción progresiva de actividades que involucren ese ejercicio intelectual, para este caso, por medio de la discusión y de actividades experimentales que hagan a los estudiantes se espera que ellos puedan adquirir ese conocimiento y así hacer posible la comprensión de un fenómeno específico. Vemos que hay una gran cantidad de variables implicadas en la actividad, sin embargo, la manera en cómo ha sido construido este trabajo, puede hacer que los estudiantes desarrollen argumentos sobre el fenómeno de subducción y así discutir no solo con respecto a su definición sino a su implicación en nuestro entorno natural.

4 La experimentación como propuesta de aula para la discusión del proceso de subducción.

Siguiendo la idea anterior de modelización para la implementación en el aula, presentamos dos actividades experimentales en pro de generar en los estudiantes discusiones en torno a ciertas variables que son primordiales en la dinámica terrestre, en principio, estas variables son los cambios de temperatura por convección, la presión, la fricción entre las placas, las densidades de éstas o la intensidad de las ondas sísmicas producidas en su interacción. Ahora, dentro del marco teórico presentado, también juegan un papel clave otras variables como la difusividad térmica, coeficientes de dilatación que van ligadas a la convección o por ejemplo la longitud de la placa, etc. Sin embargo, consideramos que la relación entre la convección y la presión, en primera instancia puede ayudarnos a entender la dinámica interna terrestre y adicionalmente, los patrones de intensidad de onda pueden ayudarnos a reconocer la estructura interna de nuestro planeta, y, con todo esto junto, se puede construir un modelo que permitirá desarrollar las discusiones en torno a la subducción y así comprender ese proceso.

Para eso, se ha dividido la actividad en tres partes o *momentos*, en los dos primeros se desarrollarán actividades experimentales, y en el último, se realiza una discusión en torno al movimiento de placas, y en específico, al movimiento de subducción. Debemos decir que esas actividades pueden ser realizadas ya sea en el aula de clases o en casa, lo importante es que el estudiante comprenda que cada actividad está íntimamente ligada entre sí. Estos tres momentos van a permitir evidenciar, cómo los estudiantes relacionan todas las variables implicadas en la actividad experimental para la discusión final. Presentamos estas actividades:

Tabla 1 . *Secuencia de Actividades en el Aula.*

Momentos	Detalles
Primer momento	Proceso inicial: Conocer la estructura interna del planeta.
Segundo momento	Relación entre presión externa y fuentes de calor.
Tercer momento	Movimiento de placas y su relación con el movimiento de subducción.

Nota: resumen de actividades hechas en el aula de clases.

Todas estas fases o momentos, que se describen a continuación, están en pro de aproximar al estudiante a una comprensión no solo del modelo de subducción, sino de aquellas teorías que explican el modelo tectónico terrestre. La construcción propuesta brinda las herramientas para comprender cómo se mueven las placas y cómo estas han sido las responsables de modelar la naturaleza tal cual la conocemos.

El primer experimento, que se encuentra vinculado al primer momento, está relacionado con la noción de convección y presión, esto con el fin de inferir las condiciones internas del planeta (el planeta presenta gradientes de presión), por supuesto que no podemos intentar emular las grandes presiones existentes allí, pero si podemos hacer que el estudiante comprenda, que hay un vínculo entre la convección y la presión ejercida por las capas internas del planeta ¿por qué proponer esta actividad? La respuesta es que todos los fenómenos relacionados con placas están ligados directamente con esta fuente de calor interna en nuestro planeta, las placas se mueven sobre una de las capas de la Tierra y esa capa a su vez genera presión sobre las otras, si es así, la presión debe tener un vínculo directo con las corrientes de convección, eso lo veremos en la actividad experimental. Para eso se ha propuesto una guía de trabajo (guía 1) en donde, por medio de unas preguntas específicas (y el experimento) se aproximará a los estudiantes a la idea antes propuesta.

El segundo experimento está vinculado con el segundo momento. va encaminado a entender y mostrar cómo se ha llegado a conocer la estructura interna del planeta, para ello, el experimento está relacionado con el registro de las vibraciones producidas por fuerzas externas, aquí esa fuerza externa es realizada por el estudiante y registrada a través de una aplicación de celular. Debemos enfatizar lo siguiente, en el texto principal de este trabajo, aunque no se encuentre un estudio relacionado con las ondas, esto sí se encuentra en los anexos de este trabajo, no se va a enfatizar sobre las ondas en general, sino cómo ha ayudado a comprender y probar que el interior terrestre, presenta una variabilidad de materiales, ¿Esta idea está ligada al momento anterior y a la subducción? la respuesta es sí, porque la actividad sísmica es la que nos ha proporcionado gran parte del conocimiento terrestre. Comprender esto hará que los estudiantes construyan las bases para entender, no solo cómo se llega a la concepción de las placas, sino además a reconocer que los mecanismos que hacen posible el movimiento, son dados en una de esas capas.

El último momento, gira en torno a esa modelización del fenómeno de subducción, modelización que en este trabajo se entiende como una elaboración teórica de conceptos y argumentos para la comprensión, en este caso, del fenómeno de subducción. Por eso esta parte de la actividad será clave para concatenar todos los conocimientos adquiridos a lo largo de los trabajos escritos y experimentales y llegar a comprender, por medio de la discusión estudiantil, no solo la subducción, sino la implicación que tiene este en la naturaleza.

4.1 Propuesta de enseñanza sobre el fenómeno de subducción.

4.1.1 Primer momento

Nuestro primer momento está enfocado en comprender cómo actúa la convección cuando se dispone de diversos fluidos y es sometido a presión externa. Inge Lehmann, sismóloga danesa, descubrió el límite entre el núcleo sólido y el líquido, mostrándonos que nuestro planeta presenta esta región con esta característica líquida. Los estudios recientes han demostrado que esta región presenta temperaturas tan elevadas como la superficie solar siendo el núcleo la fuente de calor y genera corrientes de convección en el manto terrestre. Esta convección es la máquina que produce la energía necesaria para el movimiento de las placas. Adicionalmente debemos enfatizar que, para esta actividad experimental, la forma en cómo se reproducirá la experiencia difiere de los modelos actuales relacionados con el calor interno, nuestra fuente de calor es un fluido calentado externamente, esto hace que en el proceso pierda calor por la transferencia entre un material y otro, además el fluido no está sometida a una presión externa extrema (como en el interior planetario). Sin embargo, dentro de la experiencia de aula, el fenómeno convectivo es el fenómeno clave para presentar el concepto de convección interna y así hacer que los estudiantes construyan modelos que den razón del movimiento del fluido, indispensable para comprender el cómo se mueven las placas. Para entrar en contexto, los estudiantes deberán responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cuándo las fuentes de calor generan convección?
2. ¿En qué direcciones podemos tener convección?
3. ¿La presión externa influye en las corrientes de convección? Explique.
4. Si existen diferentes fluidos en el medio, ¿afectaría la convección?
5. Si estos fluidos son sometidos a una presión externa ¿influiría en la convección?
6. ¿La viscosidad afectaría la convección?

Estas preguntas se realizan para indagar el conocimiento previo del estudiante en torno a los procesos de transferencia de calor para así poder tener un mayor criterio al momento del análisis de resultados.

Para la realización de nuestra actividad experimental necesitaremos los siguientes materiales:

- Agua y Aceite
- 4 jeringas de 10cc
- Comino, pimienta o material particulado.

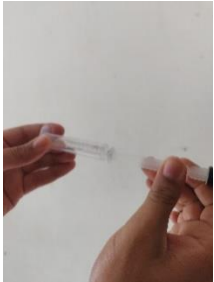
En esta parte del trabajo, tendremos un experimento que dará cuenta de la relación existente entre el aumento de presión un fluido y una fuente externa de calor.

Indicación Inicial para comenzar el montaje.

Para la realización de esta actividad experimental hay que tener en cuenta lo siguiente: Debemos tener dos agujas selladas y dos libros para tomar los fluidos e introducirlos en estas jeringas selladas. Solo se procederá a calentar agua, o sólo a calentar aceite, podemos calentar agua y después agregar el aceite. En ningún caso calentaremos aceite mezclado con agua ya que, al tener el aceite mayor punto de ebullición, el agua se evapora muy rápido haciendo que el experimento pueda tener consecuencias. Adicionalmente, en la parte derecha de cada tabla, aparecerán espacios en blanco, allí los estudiantes deben agregar las evidencias de cada uno de sus experiencias de laboratorio.

Tabla 2. *Paso preliminar para la experimentación*



❖ Separe el cilindro del émbolo ❖ Selle la punta de la jeringa por medio de una vela o estufa (este proceso tarda unos 3 segundos) ❖ Con la parte inferior del émbolo (donde aplica la fuerza) selle la punta del cilindro y espere que enfríe.	
---	---

Nota: procedimiento para el sellado de la jeringa.

Tabla 2. *Procedimiento Experimental 1er Momento.*

Experimento 1	Proceso paso a paso
	1) Caliente el agua hasta obtener burbujas, luego con la jeringa, extraiga 8cc de esa y agréguela a la jeringa sellada. La jeringa sellada debe tener 1cc de comino antes de agregar el agua caliente. Una vez agregada el agua, introduzca el émbolo y realice presión. ¿qué observa? Realice el mismo procedimiento, pero con aceite caliente (recuerde que debe hacerlo en otra jeringa) ¿qué diferencias encuentra? ¿a qué cree usted que se deba? Explique.
	2) Vuelva a calentar agua, pero esta vez, solo tome 2cc de esta y agréguelo a la jeringa sellada, la jeringa debe tener 1cc de comino. Inmediatamente agregado el agua, agregue 6cc de aceite (no debe calentarlo), introduzca el émbolo y genere presión. ¿cómo cree usted que varió el experimento con respecto al anterior?
	3) Repita el proceso 2, pero ahora inviertas las cantidades, agregue 6cc de agua y 2 cc de aceite a la mezcla, ¿observa alguna diferencia entre estas cantidades y las cantidades dadas en el experimento anterior? Explique

Nota: Cada proceso debe tener una evidencia que anexarán en los espacios en blanco.

1) Análisis de la guía 1

En esta guía (y en las que le siguen) se trabaja en grupos de 4, dentro de las respuestas dadas en torno a lo que se entiende por convección, se presentan diferentes puntos de vista, uno de los grupos expresa lo siguiente: *“La conducción y la convección tienen lugar cuando el material que se está calentando está en contacto directo con la fuente de calor”*. Otro grupo expresa lo siguiente: *“Cuando el calor es transportado por un fluido o un gas”* miremos la respuesta de un

último grupo:” *Se llega a generar convección cuando el material que está siendo sometido a un previo calentamiento se encuentra en contacto directo con la fuente de calor ya que la energía infrarroja viaja a través del espacio y esta no genera calor hasta que es absorbida*”

Aunque vemos diferentes formas de explicar la convección, todas tienen algo en común, los estudiantes entienden que, para generar convección, la fuente de calor es primordial. Sin embargo, también podemos inferir del análisis hecho por los grupos que la convección siempre se produce mientras esté en contacto directo con la fuente, quizás aquí los estudiantes están pensando más en la transferencia de calor por *conducción*, pero reconocen que se necesita algo que “fluya” para que dicho proceso sea posible. Vemos además que el último grupo hace alusión a “energía infrarroja”, aunque la idea de energía infrarroja no es clara, podemos decir que entienden que se necesita una transferencia de energía para que dicho proceso (convección) ocurra.

Cuando se habla de la relación entre la existencia que hay entre la presión generada por un agente externo y la convección, se presentan afirmaciones tales como: *“la presión es un factor variable que hará que la convección varíe y por ende también su corriente”* sin embargo, otro grupo da su respuesta en torno al interior terrestre *“si influye, al momento de hablar de las capas de la tierra, entrando la presión a variar la densidad y la forma de los materiales”*

Todos los grupos realizan el montaje experimental, aquí debemos resaltar varias dificultades en la experimentación, una de ellas era que las corrientes generadas por los fluidos eran muy poco visibles, además, dentro del experimento había que calentar aceite, por tanto, el tiempo dado para calentar el aceite no era el suficiente para visualizar claramente las corrientes. Con el agua caliente había que añadirle el comino y hacer la mayor presión externa posible, aunque el agua había cambiado de color (por el comino), el efecto de las corrientes convectivas era poco. Aun así, algunos logran ver pequeñas corrientes que transportan este comino (aunque muy pequeñas), esto también puede deberse al tamaño y también el lugar en donde se realiza el experimento ya que este fue realizado primero en Santa Marta (Magdalena, Colombia) donde está a 6msnm¹², en cambio en Bogotá (lugar donde los estudiantes se encuentran) está a 2640msnm, por tanto, las condiciones de presión y temperatura son diferentes y esto pudo haber afectado la experimentación. En toda la actividad los estudiantes logran relacionar la presión externa y los

¹² Metros sobre el nivel del mar.

cambios en las corrientes de convección, algunos grupos no solo experimentan con las jeringas en forma vertical, sino que prueban a visualizar las corrientes estando la jeringa en forma horizontal, esto con el fin de ver si las corrientes son diferentes dependiendo la orientación del objeto que contiene el fluido, dentro de la clase se concluye que, si hay un cambio, este es poco visible, pero sí debe haber un pequeño cambio, quizás a gran escala hubiese sido posible observarlo. Como parte final de esta primera actividad los estudiantes concluyen que, si algo ha de mover las placas, debe ser por el calor interno que se presenta en el interior terrestre, de alguna manera, la corriente de convección sí puede generar movimiento, pero no hay una discusión en cuanto a las posibles formas en que esto pueda ocurrir, solo se entiende que, si la cantidad de calor es lo suficiente, este tendría la energía para mover un objeto, o en nuestro estudio, las placas.

- **Conclusión de la guía y el momento 1**

De aquí observamos que los estudiantes comprenden la relación que existe entre la convección y el aumento de presión y adicionalmente, los grupos reconocen que existe una relación entre la densidad y viscosidad de un fluido en el proceso convectivo. La convección, las propiedades de los fluidos y la presión a la que esté sometido este último están ligados entre sí. Se necesita un segundo elemento que nos permita entender el interior terrestre ya que es allí en donde se produce el fenómeno convectivo, este segundo elemento nos los brinda la guía 2 propuesta en el segundo momento de trabajo.

4.1.2 Segundo momento

El segundo momento está relacionado con la estructura interna de nuestro planeta. La Tierra está conformada por capas, el manto que conforma aproximadamente el 82% de la Tierra (Tarbuck & Lutgens, 20005) por consiguiente, el 18% lo conforma el núcleo. Los materiales más densos conforman el núcleo y a medida que se asciende desde el núcleo hasta la corteza, la densidad media de los materiales desciende hasta alcanzar valores promedios de $2,7g/cm^3$. Debido a la conformación del planeta, a mayor profundidad, mayor será la presión ejercida sobre los materiales. En el ambiente en que nos encontramos, podemos realizar actividades relacionadas, tanto con las capas como con la presión a través de jeringas llenas de diferentes fluidos, la condición es que los fluidos no se mezclan para así visualizar los efectos de la presión sobre los mismos. La actividad sísmica y en general, las ondas, son los medios físicos por el cual se han dado a conocer este tipo de datos, en el contexto en el que estamos, es importante mencionar que

las placas, a través de una de las capas que conforman el planeta, es donde se presenta su movimiento. La forma de llegar a esto es contextualizando a estudiante a través de preguntas que orienten la actividad, esto acompañado de un modelo base para la comprensión de dicha actividad

Ya que el conocimiento del interior del planeta es importante para entender los modelos sobre la dinámica interna terrestre, los estudiantes deberán responder las siguientes preguntas.

- Para usted, ¿qué cree hay en el interior Terrestre?
- ¿Cómo cree usted que podemos conocer el interior de la Tierra?
- ¿Creen que podemos llegar al centro de la Tierra? ¿cómo?

Las preguntas relacionadas con este primer momento están en función del trabajo que será propuesto a continuación, para eso necesitaremos los siguientes materiales.

- Dos envases plásticos, algo importante a resaltar es que las botellas deben ser exactamente iguales.
- Una regla graduada.
- Tres tipos de arena¹³.
- Tener la aplicación *WaveEditor*, este puede ser descargado a través de playstore, y más adelante se explicará su uso y funcionamiento.

Indicación inicial para comenzar el montaje.

Se dan algunas indicaciones preliminares, esto con el fin de que, en el proceso de experimentación, haya el menor error posible:

1. Tome sus cajas o botellas y trate de ubicarse en un lugar donde haya poco ruido.
2. Si sus botellas presentan etiquetas, retírelas.
3. Clasifique su arena en arena de tipo 1, tipo 2 y tipo 3. La elección es arbitraria.
4. Tenga activado el programa de WaveEditor.

Uso y funcionamiento de WaveEditor.

¹³ O puede traer arena, aserrín, cemento.

Dentro del trabajo, se pide a los estudiantes observar cómo cambian los patrones de onda por medio de una fuerza aplicada, estos patrones han sido registrados a través de un programa nos permite registrar los

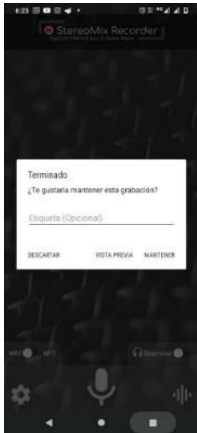
Figura 17. Logo programa

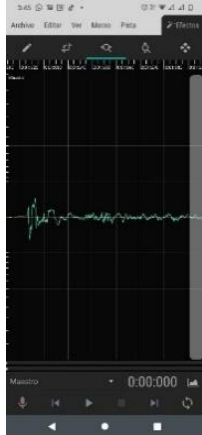
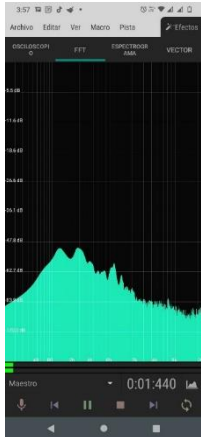


Nota: Imagen del programa WaveEditor tomada de la Playstore, Google inc.

decibeles producidos en una vibración, en el caso que nos compete, la vibración es producto de una fuerza externa aplicada sobre un recipiente. Sabemos de la física, que los decibeles, son los valores con los cuales medimos la intensidad del sonido, por tanto, el programa nos muestra la intensidad producida por esa fuerza externa. Al abrir la aplicación encontrará una imagen que indicará el inicio del programa, para verlo, se ha realizado una tabla en donde se muestra los pasos a seguir para el correcto funcionamiento del programa y así saber manejar su interfaz.

Tabla 3. Secuencia del programa WaveEditor

a. En la parte inferior aparece el botón grabación, presiona y lo enviará al set de grabación, una vez realizado la grabación aparecerá el siguiente recuadro que se ve en la figura. Allí presiona en “MANTENER” y el programa automáticamente lo guarda en el recuadro “recientemente usados de la figura 2” de atrás para acceder a él.	
b. Una vez esté en el recuadro, oprima en el archivo e inmediatamente le aparecerá el registro sonoro como en el recuadro siguiente. En la parte superior, se muestran 4 íconos, estos permiten ampliar la onda, mover la onda y escoger el lugar en donde se quiera reproducir el sonido.	

c. El programa permite ampliar la imagen de la onda obtenida, con esto podemos ver el comportamiento de dicha onda como dijimos en el punto b. observe que aquí se muestra con claridad las irregularidades dadas en los patrones de onda.	
d. Podemos observar los decibeles marcados por el patrón de onda, para acceder, vamos a la parte inferior izquierda de la figura anterior, allí, al lado del número 0:00:00 aparece un ícono en forma de gráfica, entramos allí y tendremos la siguiente imagen.	
e. En la parte superior aparecen 4 íconos: Osciloscopio, FFT, Espectroscopio, Vector. Tomaremos la opción FFT, damos play y obtendremos el patrón de registros que se observa en la imagen derecha. Podemos tomar cualquiera de las 4, sin embargo, en esta nos muestra con claridad los puntos en donde tiene mayor intensidad.	

Procedimiento.

Tabla 3. *Procedimiento de Experimentación.*

Experimento 2	Proceso Experimental.
	1) Tome cualquiera de las botellas. Realice pequeños golpes con el dedo índice en la parte inferior de la luego y registre su sonido con la aplicación. Realícelo en tres puntos diferentes de la botella y registre los sonidos por medio del programa. ¿Qué puede interpretar de esta experiencia?
	Tome la medida de la botella y divídala en 3 partes (no tienen que ser iguales). Luego, escoja sólo un tipo de arena, rellene esa tercera parte con la arena seleccionada y, repita el paso del procedimiento 1). Después tome los dos tipos de arena restante y repita el proceso ¿qué observa? ¿En qué cambia con respecto al procedimiento anterior?
	2) Tome las medidas de las dos botellas, y haga la misma división que en el paso 2). Rellene la primera botella con un solo tipo de arena, pero sin llegar a la rosca de la botella. Rellene la 2da botella con los tres tipos de arena en cualquier proporción la condición es que presente aproximadamente la misma medida que la primera botella, recuerde tener los registros de las tres arenas en esta botella. Luego, realice pequeños golpes con los dedos a cada una de las botellas por separado y compare. ¿se observa algún cambio?

Nota: Procedimiento secuencial para la comprensión de las capas internas.

Una vez realizada la actividad, vea el siguiente enlace en donde se determina cómo se ha llegado a conocer el interior terrestre, esto con el fin de comprender su estructura y además inferir el comportamiento de los materiales bajo condiciones extremas tanto de presión como de temperatura.

[¿Cómo sabemos qué hay en el centro de la Tierra? - BBC News Mundo](#)

Ahora, con base en la actividad experimental y la lectura, responda las siguientes preguntas.

1. A su criterio, ¿cómo cree usted que se formaron las capas de la Tierra?

2. En el experimento, por medio de una fuerza, registrábamos diferentes patrones de onda, si hacemos una analogía nuestro planeta, ¿quién realizaría dicha fuerza? ¿Cómo cree que la presión es un factor clave para conformar las capas de la Tierra? Explique.
3. ¿Se podría conocer con un alto grado de certeza los materiales dentro del planeta sólo con las ondas? Explique.
4. ¿Qué otros fenómenos crees podrían dar cuenta del interior terrestre?
5. Al formar capas, los materiales están sometidos a grandes presiones, ¿cómo cree usted que se relaciona el aumento de la presión con las ondas en nuestro planeta?
6. Nos dicen que el centro terrestre es líquido pero el resto sólido ¿cómo lo saben? y ¿cómo cree usted que es esto posible?

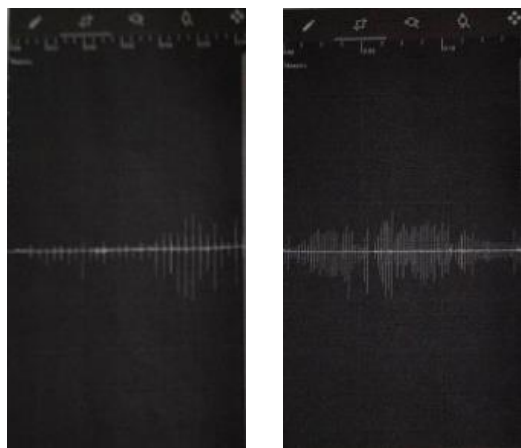
Todas las respuestas de los estudiantes serán registradas a través de tablas en donde se comparará las respuestas de todos los grupos de trabajo.

2) Análisis guía 2

Toda la actividad hecha para este segundo momento fue realizada en casa, a diferencia del primer momento que sí tuvo lugar, tanto en la casa como en el aula de clases, esta actividad en casa presentó una ventaja y es que, al estar en un espacio con poco ruido, el programa podía registrar los patrones de onda sin interferencia externa o con poca interferencia.

Dentro de la actividad experimental, los estudiantes observan que los patrones de onda registrados por medio del programa varían de un material a otro, de aquí encontramos respuestas tales como: *“los materiales rugosos presentan mayor intensidad que los que no”* o *“esto me recuerda las copas llenas de agua para definir la música”* haciendo referencia en este último caso, a las diferentes notas musicales que se registran con la cantidad de contenido en los mismos materiales.

Figura 18. Comparación entre registro sonoros.



Nota: Diferentes patrones de onda producto de la diferencia entre los materiales utilizados por los estudiantes.

Vemos un ejemplo de toda esta actividad en la figura 18, donde nos muestra que es evidente la diferencia entre los patrones de onda dados entre un material y otro, esto hace inferir a los estudiantes que la forma del material es la responsable de esos patrones, por ejemplo, se presentan respuestas como: *“el jabón al ser granulado emitió el menor sonido posible”* o *“la sal al ser golpeada sonaba más”* por tanto, se comprende inmediatamente esta diferencia registrada en los patrones de onda.

Llegando al concepto de cómo saber entonces la existencia de capas nuestro planeta, los estudiantes, hacen el análisis y se presentan respuestas variadas, uno de los grupos responde al interrogante así: *“Si la Tierra tuviese la misma composición que su interior se comportaría exactamente como otras ondas”* o por ejemplo *“las ondas que se utilizan y sobre todo la forma de reacción de los materiales”* aquí podemos interpretar que los estudiantes relacionan las ondas con los materiales sin asociar un fenómeno terrestre que pueda dar explicación de su interior, la respuesta entonces está ligada a la reacción que tendrá el material con la onda. Un grupo en particular de respuesta en términos económicos *“Pues el que cada vez sea más costoso llegar al centro de la tierra”* aquí inferimos que, según este grupo, para conocer el interior terrestre, debemos excavar para tomar pruebas directas, en este caso, el grupo no asocia la relación existente entre las ondas y el interior terrestre.

Los estudiantes, además, hacen la analogía de esos “golpes” realizados. Para unos grupos, es la gravedad la que hace que las ondas sean producidas, y para otros, son las placas las que producen estas ondas por eso se presentan respuestas como *“dicha fuerza la realizaría la gravedad donde esta hace que la tierra gire constantemente hacia abajo”*, *“es la gravedad la que permite esta fuerza y la que permite la propagación de estas ondas”* dentro de la clase realizada, los grupos asocian a la gravedad como la fuerza ya que es esta la que produce que los materiales se hundan al interior terrestre, pero al parecer entienden que la gravedad es un medio para propagar ondas. Otro grupo dice lo siguiente *“la fuerza proviene del movimiento y choque de placas tectónicas”*

vemos entonces que aquí reconocen a las placas como las principales responsables de esa fuerza que produce las ondas internas. En el análisis de esta parte del trabajo se reconocen que existe una relación directa entre la cantidad de capas y los registros de las ondas, esto puede ser entendido como la presión que ejerce una capa sobre la otra, “a la presión como una variable a tener en cuenta en las ondas

- **Conclusión de la guía y el momento 2**

Los estudiantes relacionaron la diversidad de patrones de onda con los diversos materiales, cada material, aplicando aproximadamente la misma fuerza, presenta intensidades diferentes. El modelo presentado permitió aproximar al estudiante a entender el papel de las ondas y su importancia en los modelos vinculados a comprender el interior del planeta. Debemos enfatizar que los estudiantes relacionan el concepto de gravedad con la propagación de las ondas, se debe decir que los estudiantes en este caso, no presentan una claridad entre esos dos fenómenos, hay que vincular las ideas dadas con lo que se entiende sobre la propagación de ondas.

Ya obtuvimos los dos conceptos claves para aproximarnos al entendimiento del interior terrestre, ahora vinculamos estos dos problemas con la dinámica de las placas y así discutir el fenómeno de subducción, esto da paso entonces a nuestro último momento.

4.1.3 Tercer momento

El tercer momento se encuentra relacionado con la tectónica de placas y el fenómeno de subducción. Por tanto, la dinámica dada en este tercer momento es la discusión del modelo de subducción y cómo este modelo puede ser explicado a través de las actividades hechas en los momentos 1 y 2 respectivamente. Se muestra por medio de videos que el planeta se encuentra fragmentado en muchas porciones o piezas llamadas placas, estas se mueven de diversas formas sobre la superficie terrestre. El movimiento de subducción se da por una de estas interacciones que se dan entre las placas, cuando una placa se mueve por debajo de otra, genera grandes presiones, torques y grandes fuerzas de fricción, que conlleva al hundimiento de esta por debajo de la otra hasta llegar a la astenosfera, lugar en donde, a partir de la convergencia de las placas, se genera nuevo material y se repite el ciclo indefinidamente. El video que los estudiantes deben observar es el siguiente de allí responder las siguientes preguntas:

CIENCIA CURIOSA: Deriva continental - desplazamiento y formación de los continentes (animación) - YouTube.

- ¿Sin fuente de calor, podrían moverse las placas? Explique.
- ¿Cómo cree que la convección mueve las placas?
- ¿Podría la convección dar razón de la rotación de las placas? Realice un dibujo mostrando como cree usted que son esas corrientes.
- ¿Cree usted que son suficientes las corrientes de convección para mover las placas?

Una vez llegados aquí, y entendiendo cómo se mueven las placas, entonces observe los siguientes videos que dan una explicación del movimiento de subducción y con base en esto generaremos las siguientes discusiones y después responda las siguientes preguntas.

➤ [Mountain building: Uplift, erosion and exhumation - YouTube](#)

➤ [Subducción - Geología - 4eso - YouTube](#)

- ¿cómo entiende usted el fenómeno de subducción? Explique.
- ¿Qué pasaría si no existiera la subducción?
- ¿cómo crees que sería nuestro planeta?
- ¿La subducción puede generar convección? Explique.
- La subducción destruye corteza, entonces ¿por qué la Tierra no disminuye su tamaño?

3) Análisis guía 3

Ya sabemos que esta última guía, tenía por finalidad la discusión en torno al movimiento de placas y el fenómeno de subducción. Vimos que en esta actividad fue importante la visualización de varios videos en donde se realizan simulaciones y montajes a escala del movimiento de placas y la subducción. Ya en este punto, los estudiantes reconocen que la convección sí hace parte del movimiento de placas tectónicas, además entienden que la gravedad es clave en el hundimiento de las placas “ *las corrientes de convección si tienen la capacidad de generar los movimientos de opresión de las placas también podrían ser suficientes en el*

movimiento de las placas” “*Creeríamos que esto puede llegar a depender de la fuerza en la que se dé la convección, porque si se genera una muy grande lógicamente la rotación de las placas va a ser mayor a una que su intensidad no es mucho.*” Ya en este punto los estudiantes identifican que las capas juegan un papel clave en el movimiento de las placas, se relaciona la convección como un factor determinante en las corrientes convectivas. Adicionalmente, el movimiento de las placas y la presión que estas (las placas) están relacionadas entre sí. Desde aquí se pasa a ver cómo los estudiantes entienden el fenómeno de subducción, y obtenemos lo siguiente “*un proceso que impulsa el movimiento de placas tectónicas de la tierra*” esto también se evidenció dentro de las clase en donde se entiende que la placa, al hundirse, se “estira” y hace que ocurra el proceso, quizás aquí se está entendiendo este proceso como en la convección de Rayleigh-Bénard en donde las placas se mueven como si fuese una cinta, pero hay un punto común y es que los grupos entienden que las placas no se mueven en una sola dirección sino de manera variada, aunque tienen a la gravedad como parte importante, no se logra dar un detalle más profundo en relación al movimiento.

Vemos al final la importancia del fenómeno Ahora, dentro de las preguntas respuestas dadas en la guía, realizamos la pregunta sobre la subducción se ven definiciones como “*Creemos que la subducción es precisamente el movimiento que una placa tectónica realiza al sobreponerse en otra placa tectónica. Esto precisamente se genera ya que una de las placas se enfría generando así que gane mayor densidad en esta, por lo que esta placa se termina hundiendo*” vemos, por tanto, que sí se logran vincular todas las actividades propuestas con el fenómeno subductivo, y se llega a una comprensión del modelo de subducción y también de la importancia de éste en nuestro entorno natural, las 3 propuestas generan procesos de indagación en ciencias y se consideran que son procesos claves en la enseñanza.

- **Conclusión guía y momento 3**

Se observa que los grupos reconocen a la tectónica de placas como producto de la actividad interna terrestre y una forma de saber cómo interactúa internamente es a partir del estudio de las ondas, las placas tienen movimiento horizontal o variado, reconocen además que la tectónica es clave para los procesos naturales que tienen lugar en la Tierra. El fenómeno de subducción es entendido como uno de esos movimientos de placas, y este es el responsable de la formación de

cordilleras, relacionan a la gravedad como responsable del hundimiento de placas junto con la convección, asumiendo entonces que la placa presenta un papel activo en la dinámica terrestre.

De toda esta experiencia vemos que los grupos analizaron los modelos propuestos sobre el interior terrestre y a partir de allí se realizó las discusiones pertinentes en torno al proceso de subducción. Toda la actividad realizada en torno al fenómeno fue nueva para los grupos, como hemos mencionado al principio de este escrito, son otras áreas del conocimiento las encargadas de mostrar aquellos procesos que son recurrentes en el interior de nuestro planeta. Por tanto, realizar actividades en donde la física juega un papel principal hizo que el trabajo realizado fuese satisfactorio en los grupos, esto quedó demostrado dada la gran participación que se mostró en el curso, podemos decir que este tipo de enseñanzas cautivan a los estudiantes y hacen que las discusiones propuestas presenten un carácter sólido en cuanto a la teoría se refiere. No solo se basan en hipótesis, sino que asocian cada experimento con explicaciones en torno al funcionamiento interno del planeta, y a partir de allí, del movimiento de placas. Vemos que la actividad alcanza su objetivo de hacer que los estudiantes construyan esos modelos que dan cuenta de las placas terrestres.

5 Conclusiones.

Si hiciéramos un análisis global de la percepción de los estudiantes en torno a las temáticas relacionadas con ciencias de la Tierra podemos decir que, en primera instancia, se logró una gran motivación para la realización de todas las actividades propuestas, esto fue evidenciado en el aula de clases dada la gran actividad y participación que se presentó al momento de la implementación del trabajo. Además, la manera en cómo fueron abordadas las temáticas y cada uno de los procesos que llevaron a la finalización de este trabajo fue ampliamente aceptada para el grado en el cual fue aplicado, mostrando así el interés para aprender más sobre cómo es el funcionamiento de nuestro planeta.

Una vez finalizada todas las propuestas de aula, procederemos a analizar el trabajo realizado por los grupos estudiantiles del grado 11C y así comprender todas aquellas discusiones que fueron realizadas en el aula en torno al fenómeno de subducción. Los razonamientos que se han obtenido de cada grupo dan cuenta de la comprensión adquirida sobre los procesos internos dados en nuestro planeta, ellos presentan su actividad experimental y se discute en el aula cómo cada actividad va ligada a la dinámica interna del planeta. Debemos decir que, aunque la implementación realizada fue propuesta en grupos de 4 personas, hubo grupos que fueron conformados por dos y tres personas, todo esto se dio porque la actividad fue realizada de manera semipresencial, algunos grupos hicieron el trabajo en casa y otros grupos realizaron el trabajo en el aula de clase.

A partir de toda la propuesta hecha para la comprensión del fenómeno de subducción, se realiza un eje orientador con todos los objetivos propuestos en cada una de las enseñanzas, todo esto será recogido en la siguiente tabla a fin de visualizar dichos objetivos.

Tabla 4. *Objetivos propuestos para la implementación de la actividad experimental*

Objetivo General: Hacer que los estudiantes reconozcan en interpreten, por medio de la actividad experimental, los modelos explicativos del interior terrestre y el fenómeno de subducción.	
Momentos	Objetivos Específicos.
1er Momento	Comprender los modelos relacionados con la convección de un fluido confinado y la presión.
2do Momento	Reconocer cómo las ondas juegan un papel clave en la de comprensión del interior terrestre

3er Momento	A partir de los momentos anteriores, debatir sobre los modelos de placas y cómo la subducción es responsable de diversas formaciones geológicas.
-------------	--

Nota: cada uno de los objetivos dados para cumplir los momentos serán unidos para así cumplir con el objetivo general de este trabajo.

Por otro lado, cada una de las actividades propuestas hizo posible que los estudiantes pudiesen organizar ideas no solo de la tectónica de placas, sino del movimiento de subducción. Sin embargo, dentro de las soluciones dadas por los estudiantes en torno a las guías vemos que se encuentran algunas falencias en torno a organizar ideas de física para la explicación del principio por el cual se rigieron los experimentos, esto se puede ver en las respuestas dadas por ellos en dichas guías (ver anexos), unos grupos presentan unas respuestas que, podríamos decir, tienen mayor énfasis en la física que otros grupos, con esto hacemos referencia a las ideas planteadas para la solución de las actividades, sin embargo, también dentro de las respuestas planteadas se evidencia que existe una investigación de los estudiantes para entender los mecanismos terrestres que, junto con la actividad experimental y las discusiones hechas, facilitan la comprensión del modelo en torno al fenómeno de subducción. Debemos enfatizar que la “sencillez” que se requería para la obtención de los materiales necesarios para la experimentación, juntos con la motivación, hicieron posible lograr con éxito que los estudiantes aprendieran y adquirieran el conocimiento para entender el fenómeno antes mencionado.

La ventaja de los trabajos relacionados con ciencias de la Tierra es que, al ser una ciencia reciente, podríamos tener una variabilidad de problemas para llevar a los estudiantes. Si buscamos archivos y/o documentos en relación con estas temáticas en el aula, encontraremos que es poco lo que se ha trabajado al respecto, haciendo entonces que presenta retos a la hora de plantear ideas en el aula para la enseñanza de los fenómenos terrestres incluyendo además que se debe diseñar las actividades que puedan vincular las ideas necesarias para así construir un modelo de explicación. Todo esto requiere de ensayo y error, como ejemplo, tenemos el primer experimento en el que hubo algunos fallos y también algunas variables que no estaban incluidas inicialmente al diseñar la actividad como la altura de las ciudades en donde se realizó la actividad o las condiciones mismas en que se hicieron, sin embargo, se logra hacer que los estudiantes puedan entender las ideas centrales de la experimentación y así relacionan las variables que serán extrapoladas al interior terrestre.

La actividad virtual para el docente también presentó grandes retos, al no estar en el aula, no podía interactuar directamente con los estudiantes sino a través de otro docente para llevar a cabo la correcta implementación de la actividad, pero a pesar de eso, se evidenció la participación y colaboración de los grupos para la realización del trabajo fue un éxito, concluimos aquí que la actividad puede ser realizada independientemente de la modalidad, se necesita un tema interesante y motivar al estudiante a que estos nuevos conocimientos hacen parte integral del proceso de aprendizaje en relación a la naturaleza, el mundo cambia y vemos ahora que hay mayor preocupación por el cambio climático, por los océanos, la sobreexplotación etc. De allí que los intereses en estas actividades sean cada vez mayores en nuestras aulas de clase.

A partir de todo esto y del análisis realizado por los estudiantes en cada uno de los ejes propuestos, podemos decir que los estudiantes:

- I. Logran relacionar la convección con la presión, además logran identificar que las propiedades de un fluido afectan a la convección y que esta es la fuente que mueve las placas tectónicas. Por tanto, identifican que existen diferentes patrones de convección y estos se tienen en cuenta para entender aquel mecanismo que es capaz de producir movimiento de placas.
- II. Relacionan las ondas como parte esencial en el momento de determinar las diferencias entre dos o más materiales, y además se vinculan estas ondas con la actividad sísmica y a partir de allí concluyen que es a partir de las ondas que se puede tener idea sobre el interior terrestre. Por tanto, vemos que, tanto en este como en el enunciado I, la actividad experimental jugó un papel clave para la comprensión del interior terrestre y también para entender cómo se ha llegado a conocer los procesos que ocurren dentro de nuestro planeta.
- III. Comprenden los modelos de tectónica de placas y dan explicación del movimiento de subducción, los estudiantes discuten el fenómeno subductivo en torno a la relevancia que tiene este en los procesos naturales y, a partir de las variables aprendidas en el trabajo reconocen que la subducción es parte integral en nuestro planeta y es un proceso importante para la formación de cordilleras e islas volcánicas.

Vemos que se ha obtenido un conglomerado de logros asociados tanto con la actividad experimental como con aquellos análisis que los grupos realizan para entender la tectónica de placas. Se apuesta a que este tipo de temáticas sigan siendo trabajadas en trabajos posteriores. Este tipo de actividades novedosas en el aula despierta el interés, tanto de los estudiantes como actores principales como del docente que hace el trabajo de guía y mediador en cada uno de los debates dados en torno a un problema dado (subducción en este caso), así que se puede decir que, de toda esta experiencia adquirida en el aula, sin temor a equivocación, que se ha cumplido con el objetivo de aprendizaje ya que logró hacer que los estudiantes analizaran los modelos dados sobre el interior terrestre y a partir de allí se logre la discusión en torno a la subducción, comprendiendo que las herramientas físicas son parte integral para el entendimiento de la dinámica interna terrestre. La actividad experimental y el análisis de cada uno de los trabajos propuestos hace que los estudiantes reconozcan y asocien los modelos explicativos del interior terrestre.

6 Referencias

- Aduriz-Bravo, A., & Izquierdo-Aymerich, M. (2009). Un modelo de modelo científico para la enseñanza de las. *REVISTA ELECTRÓNICA DE INVESTIGACIÓN*, 11.
- Alfaro, P., Alonso-Chavez, F. M., Fernández, C., & Gutiérrez-Alonso, G. (2013). La Tectónica de Placas, Teoría Integradora sobre el Funcionamiento del Planeta. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*.
- Arcila Rivera, M. (2004). Ingeominas y la Red Sismológica Nacional de Colombia: quince años estudiando la sismicidad del país. *Revista del Instituto Colombiano de Geología Y Minería*, 5.
- Basterrechea, I. E. (2015). *Inestabilidades térmicas: Célula de Bénard*. País vasco: Universidad del país Vasco.
- Bercovici, D. (2007). Mantle Dynamics Past, Present and Future: An introduction and Overview. *TREATISE ON GEOPHYSICS*, 10-13.
- Bercovici, D., & Ricard, Y. (2000). The Relation Between Mantle Dynamics and Plate Tectonics: A Primer. *American Geophysical Union*.
- Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de transmisión del calor*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Fernandez, C., Gutiérrez-Alonso, G., & Alfaro, P. (2016). ¿Qué sabemos y qué desconocemos sobre el motor de las placas litosféricas? *Didáctica de las ciencias experimentales*.
- García Cruz, C. (2012). El origen de los Continentes . *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 37.
- González, M., & Figueras, S. (2005). El Tsunami de Sumatra del 26 de Diciembre de 2004. *Enseñanzas de Ciencias de la Tierra*.
- Gutiérrez-Alonso, G., Fernández, C., Alfaro, P., & Alonso-Chavez, F. M. (2019). ¿Qué mueve las placas tectónicas? *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*.
- Hjortenber, E. (2009). Inge Lehmann's work materials and seismological epistolary archive. *Annals of geophysics*.
- Martínez Nyman, S. S. (2020). *Tectónica de Placas y la Evolución Humana [Grado en Arqueología, Universidad de Sevilla]*. Sevilla.
- Molina , S., Giner, J. J., & Jáuregui, P. (2008). El Tamaño de los Terremotos: Intensidad y Magnitud. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*.
- Muñoz, R. (27 de Febrero de 2018). *El País*. Obtenido de https://elpais.com/tecnologia/2018/02/27/actualidad/1519725291_071783.html
- NACIÓN. (14 de Marzo de 2021). *EL TIEMPO*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/temblores-en-colombia-lugares-donde-mas-ha-temblado-este-ano-en-el-pais-570861>
- Panza, G. F., & Romanelli, F. (2001). Beno Gutenberg contribution to seismic hazard assessment and recent progress in the European-Mediterranean region. *Earth-Science Reviews*.

- Prasath, R. A. (2014). *History on Depth to Mohorovicic Discontinuity and Its recent Developments in the Northwest Himalaya*. India: Department of Earth Sciences, Indian Institute of Technology.
- Pueyo, E. L. (2008). EL PALEOMAGNETISMO: FUNAMENTOS, MÉTODOS Y APLICACIONES AL ESTUDIO DE LA CADENA PIRENAICA. *Investigación geológica y recursos didácticos.*, 9.
- Sagripanti, G., Bettiol, A., & Seitz, C. (2007). Terremotos. *Programa de divulgación científica para la enseñanza de las ciencias*.
- Sierra-Porta, D., García-Lugo, G., Delgado, M., Mora, C., & Chourio, A. (2008). Midiendo el Diámetro de la Tierra. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las Ciencias*.
- Stern, R. J. (2018). The Evolution of Plate Tectonics. *The Royal Society Publishing*.
- Summeren, J. v., Conrad, C. P., & Lithgow-Bertelloni, C. (2012). The Importance of Slab Pull and Global Asthenosphere to Plate Motions. *Geochemistry Geophysic Geosystems*.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra, una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Educacion S.A.
- Vilte, M., Hoyos, D., & De Paul, I. (2005). *Convección de Bénard: Visualización del fenómeno y determinación de parámetros relevantes empleando un programa de cálculo*. La Plata: ANALAS AFA. Vol 17.
- Weneger, A. (2018). *El origen de los continentes y los océanos*. Barcelona: CRITICA.
- Zannie, M. (16 de Abril de 2020). *El Universal*. Obtenido de <https://www.eluniversal.com.mx/destinos/que-es-un-geiser-y-cual-es-el-mas-impresionante-del-mundo>

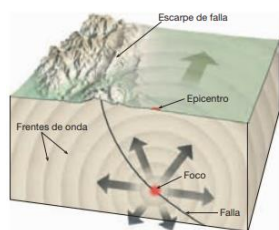
7 Anexos.

7.1 Capas internas de la Tierra.

Las vibraciones producidas en el interior de nuestro planeta es lo que conocemos como terremoto y se da a lo largo de las fracturas del planeta. Mostramos dos definiciones, la primera dada por Tarbuck & Lutgens (2005), según la cual “Un terremoto es la vibración de la Tierra producida por una rápida liberación de energía” y una segunda dada por (Sagripanti et al. 2007), que nos definen terremoto como “una liberación repentina de energía en las rocas al interior de la tierra”. En los dos casos se muestra una concordancia ya que el terremoto es un proceso natural que tiene como efecto, liberar una gran cantidad energía que se propaga en forma de ondas mecánicas, esas ondas viajan a lo largo del planeta hasta su disipación. Para darnos una idea de esto, observe la Figura 18. Vemos que el foco es lugar donde se propagan las ondas y este foco está en la falla en la cual se ha fracturado la capa, las ondas producidas por este efecto también son conocidas como ondas sísmicas. Adicionalmente, las ondas sísmicas presentan ciertas características relacionadas con la forma en cómo se propagan en el planeta. Según (Molina et al. 2008) “las ondas sísmicas están clasificadas en 2 tipos y nos entregan información acerca del interior terrestre”. La detección del fenómeno sísmico es posible gracias a la herramienta llamada *sismógrafo* que nos permite registrar los terremotos producidos en algún lugar específico del planeta.

Cada onda sísmica tiene características y propiedades específicas que son clave para comprender no solo la dinámica, sino además el interior de nuestro planeta. Como toda onda, presenta elementos propios que describen su comportamiento como la amplitud, frecuencia o periodo de vibración, pero la diferencia entre una onda y otra se encuentra en cómo cada una de las ondas interactúa con el medio en el cual es propagada.

Figura 19. Terremoto en un punto del planeta

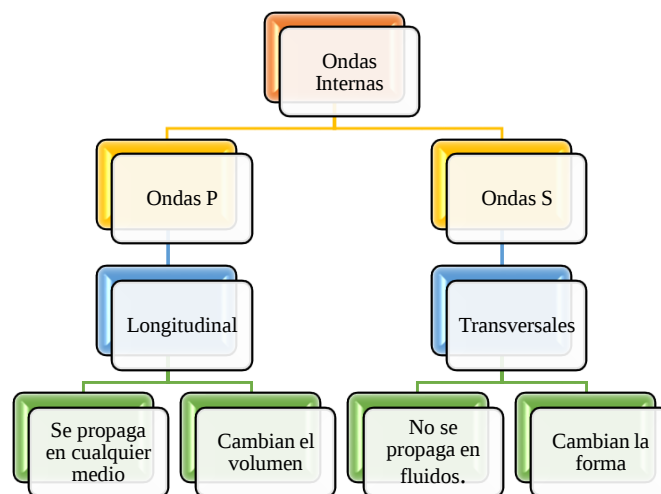


Nota: Las ondas viajan en forma circular hasta su disipación de manera similar a las ondas producidas al lanzar una piedra en un estanque
Tomada de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* por Tarbuck & Lutgens, 2005 (p.309) PearsonPrenticeHall.

En un curso básico de física, nos muestran las diferentes formas en cómo se propaga una onda por el medio. Si la onda va en la misma dirección en la cual el medio es propagado, entonces tendremos una *onda longitudinal*, pero si la onda viaja en dirección perpendicular al medio de propagación, entonces tendremos una *onda transversal*. Las ondas producidas por un terremoto presentan estas características, son

las llamadas ondas P y ondas S, éstas son dos de los 4 tipos de onda presente (las otras son las ondas Rayleigh y las ondas Love). Las ondas P son longitudinales, esta característica hace que las ondas compriman y estiren la roca, piénsese por ejemplo en un acordeón que se cierra y se abre debido a la fuerza aplicada en sus extremos, entonces, por tener esta propiedad, la onda P puede propagarse por cualquier medio. Las ondas S son transversales, eso significa que la onda no comprime y dilata el material porque a diferencia de la onda P, se mueve de manera perpendicular al mismo, si no dilata el material, entonces la onda mantendrá el volumen del elemento por el cual se transmite de manera constante, si este es el caso, entonces la onda S no puede transmitirse en ningún fluido porque éstos no presentan cizalladura, no en vano a esta onda también se le conoce como de cizalla. Visualicemos estas propiedades a través del siguiente mapa conceptual dado en la Figura 19.

Figura 20. Mapa conceptual de ondas internas



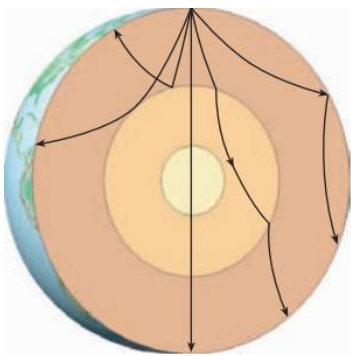
Nota: Los tipos de onda y la forma en cómo se propagan en el interior terrestre nos dan cuenta de la estructura interna del planeta.

Cuando se estudia la propagación de las ondas longitudinales en un medio (ondas mecánicas), se determina que la velocidad en que se mueven, depende de la elasticidad del material (módulo de Young) así como de la densidad y hasta el módulo de corte. A partir de esto podemos afirmar sin lugar a dudas que la velocidad será diferente dependiendo el material que atraviese. Claro, el proceso al que es sometido un material también variará la velocidad de propagación de la onda (tensión, tracción etc.); si tenemos un cuerpo desconocido, esperaríamos que la velocidad a la cual se propagan las ondas en su interior debe ser la misma ya que se trata de un cuerpo homogéneo, sin embargo, si observamos cambios en la velocidad de propagación, pensaríamos

que el cuerpo no es homogéneo sino que está compuesto por uno o varios materiales y, si observamos un cambio de dirección, entonces ese cuerpo estaría sometido a algún esfuerzo mecánico.

¿Cuál es la importancia de todo esto?, pues porque estas ondas nos dan información sobre el interior de nuestro planeta, no solo de su tamaño, sino de su estructura interna. La medición del tamaño de la Tierra se ha realizado de distintas maneras, midiendo la sombra producida en dos ciudades distantes o por métodos sencillos como el método Gerver (Sierra-Porta et al. 2008), sea cual sea la forma, sabemos que nuestro planeta presenta un radio aproximado de 6370km. adicionalmente sabemos de la física que la presión a la cual es sometido un objeto dependerá de la profundidad. A principios del siglo XX, el meteorólogo y sismólogo Andrija Mohorovicic realizó uno de los mayores descubrimientos en geofísica. A partir de las comparaciones hechas con los datos obtenidos por los diferentes sismógrafos en Europa central, Mohorovicic dedujo que las ondas P presentaban desviaciones alrededor de los 50km de profundidad y estas desviaciones solo pueden existir si el material que atraviesa esa onda es diferente (Prasath, 2014). Esto indicaba que el planeta no era homogéneo como se pensaba, sino que presentaba diferentes tipos de materiales, o por lo menos, después de los 50km la composición cambiaba.

Figura 21. *Desviación de Ondas Sísmicas*



Nota: Las desviaciones de las ondas son producto de la presión existentes y de las diferentes composiciones de los materiales, así se determina que nuestro planeta está en forma de capas. Tomada de: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* por Tarbuck & Lutgens, 2005 (p.344) PearsonPrenticeHall.

La manera en cómo se desviaban esas ondas, indicaba que los materiales allí deben deberían ser diferentes, por tanto, no era posible que la Tierra fuese completamente homogénea. Las siguientes discontinuidades fueron descubiertas por el sismólogo alemán Beno Gutenberg y por la sismóloga danesa Inge Lehmann, teniendo por nombres actuales discontinuidad de Gutenberg y discontinuidad de Lehmann respectivamente (Panza & Romanelli, 2001) (Hjortenberg, 2009) Todo esto evidentemente a partir de la actividad sísmica, para verlo detalladamente observe así Figura 21.

Allí se observa con claridad que, si se presenta una desviación, es porque los materiales dentro del planeta son diferentes, y de allí se concluyó que nuestro planeta presenta capas bien definidas.

7.2 Respuestas dadas por los estudiantes en cada una de las guías de trabajo.

En la siguiente tabla se presentan las respuestas de algunos grupos de estudiantes en torno a las guías propuestas hechas en el aula de clases (y en casa).

7.2.1 GUIA DE TRABAJO 1.

Preguntas realizadas	Respuestas dadas por los grupos	Análisis de las respuestas dadas
¿Cuándo crees que las fuentes de calor generan convección?	-Grupo 1: “Cuando cierto material puede tener transmisión de calor a causa de su contacto con fuentes de calor, variando entre si las temperaturas para que exista convección - Grupo 2: “La conducción y la convección tienen lugar cuando el material que se está calentando está en contacto directo con la fuente de calor “ -Grupo 3: “Tiene lugar en líquidos y gases y se produce cuando las partes más calientes de un fluido ascienden hacia la zona más fría” -Grupo 4: “El calor al mezclarse con algunos materiales provoca una curvatura dando como resultado la convección”	Vemos que se presenta un criterio en torno a que la convección tiene como principio una fuente de calor, el grupo 3 expresa en detalle cuándo se genera convección a partir de un fluido, aunque se debe profundizar más. Los otros grupos afirman que se debe estar en contacto directo, entendiendo aquí más un proceso de conducción, sin embargo se entiende que debe existir algún movimiento para que la convección sea posible.
¿En qué direcciones podemos tener la convección?	-Grupo 1: “La dirección puede depender a su posición y también presentan una clara dirección paralela entre ellas, formando así una dirección ya determinada” -- Grupo 2: “Esto depende de en donde se genere, por ejemplo, en una	Los grupos presentan una idea en común en relación con la orientación que tenga el cuerpo al momento de estar en una fuente de calor. El grupo 3 hace alusión a “la situación” aunque no especifica cual. En

	olla va hacia abajo y en una fogata hacia arriba “ -Grupo 3: “La corriente convectiva puede ir en cualquier dirección por ejemplo horizontal o vertical dependiendo de la situación” -Grupo 4: “Consideramos que se pueden generar para cualquier dirección tanto para el norte como para el sur. Aunque es dependiente de la orientación en la que se encuentre”	los experimentos se rotaba la jeringa que contenía el fluido y en algunas ocasiones se observaba este cambio. Así que la respuesta está en torno a lo evidenciado en el experimento.
¿Podría la presión influir en las corrientes de convección? ¿cómo?	-Grupo 1: “La presión si influye en la corriente de convección y esto lo podemos observar en la convección atmosférica, donde el aire al calentarse se hace menos denso y empieza a ascender y de forma inversa cuando el aire es más frío y más denso” -- Grupo 2: “Si, esto es debido a que, al momento de hablar de capas de la Tierra, entrando la presión a variar la densidad y la forma de los materiales “ -Grupo 3: “La presión junto con la estructura atómica genera reacciones químicas que generan calor, la creación de esta energía calorífica afecta la dirección en la que se da mayor presión, mayor libertad de movimiento” -Grupo 4: “Podría ser que la convección puede realizar un cambio generado por la temperatura a lo mejor esta fusión con la presión podría generar unas curvaturas más instantáneas o repentinas”	Se habla de la Tierra y se habla de la atmósfera, pero no se muestra algún documento en donde se pueda afirmar el argumento dado por los estudiantes. En los 3 primeros grupos ya se habla de la relación con la Tierra, aquí lo estudiantes ya lo asocian con el trabajo de investigación docente. El grupo 4 presenta una respuesta que no se ajusta a la pregunta de la guía, asumiendo que la presión se puede “fusionar” con la temperatura.

¿Si hay diferentes fluidos, creen ustedes que la convección sería diferente?	-Grupo 1: “La convección está ligada a las diferentes masas de los fluidos o los gases que estén presentes, es por esto que se da una variación en la convección y resulta ser diferente” -- Grupo 2: “No, porque se nos dice que la convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos, más no se nos dice que deben estar por separado por lo cual al ser fluidos siguen cumpliendo su función a pesar que sean varios “ -Grupo 3: “Si porque los fluidos al tener propiedades diferentes, el estado o las componentes, pueden transferirse el calor de manera distinta” -Grupo 4: “Si, porque hay diferentes fluidos, las propiedades serían diferentes y se podrían considerar una convección forzada”	Los grupos dan respuesta afirmativa a la pregunta planteada siendo excepción el grupo 2. Vemos que la respuesta afirmativa está ligada a las propiedades de los fluidos, aunque en ningún grupo se mencionan tales propiedades, sin embargo, se puede inferir que los grupos dan razón del comportamiento de los fluidos cuando están en una fuente de calor. El grupo 2 no hay claridad en la explicación, allí se habla de materiales fluidos sin explicar el significado del mismo, podríamos entender con material fluido quizás a los materiales que, sometidos a grandes temperaturas, pasan por el proceso de fusión y hace posible su “flujo” (debido a que se encuentran en estado líquido”
¿Piensa que la densidad de un fluido afecta a la convección? ¿por qué?	-Grupo 1: “La densidad en si varia gracias a los cambios de presión y también de temperatura, cuando aumentamos la temperatura la densidad disminuye y esto genera una variación en la convección”	En esta pregunta se generan varias interpretaciones, aunque en los tres primeros grupos se da, de cierta manera, una respuesta afirmativa. Debemos decir que las

	-Grupo 2: “La convección térmica es la que afecta directamente la densidad pues la temperatura es la propiedad que afecta a dicha densidad “ -Grupo 3: “Si porque la diferencia de temperatura o densidad genera el poder para las corrientes de convección” -Grupo 4: “No, esto se le llamaría convección natural en la que el movimiento del fluido se debe a las diferencias en la densidad del fluido por la variación de la temperatura entre dos cuerpos”	respuestas dadas por los tres grupos muestran que la temperatura y la densidad están correlacionadas, en indirectamente lo asocian a la convección ya que esta se da debido a diferencias de temperatura entre fluidos. El grupo 4 presenta una respuesta negativa porque para este grupo la densidad no afecta en el proceso de convección. Sin embargo, al analizar la respuesta de este grupo vemos que la densidad está presente, aunque afirman que ella varía sin profundizar en cómo lo hace.
Para ustedes ¿qué es la viscosidad? ¿creen ustedes afecta la convección?	-Grupo 1: “La viscosidad es una medida de la resistencia de un fluido ante una deformación que se le genere, así que se concluye que esto puede afectar a la viscosidad en el sentido de que encontramos algunos fluidos muy resistentes al calor y esto dificulta la convección producida” -Grupo 2: “La viscosidad es un fluido o sustancia espeso o de carácter resistente; sí creemos que puede afectar el proceso de convección debido a la densidad del fluido viscoso”	Los grupos entienden a la viscosidad como algo pegajoso o como una medida de la resistencia a moverse, aunque la manera en explicar esto es poco clara, por ejemplo, como el grupo 3 en donde afirman que la viscosidad depende del gradiente de velocidad, sin especificar el gradiente mismo o en el grupo 4 donde lo

	-Grupo 3: “La viscosidad es la resistencia del fluido y dependen del gradiente de velocidad del flujo” -Grupo 4: “La viscosidad es una propiedad pegajosa, no creo que la afecte porque la convección transfiere el calor por el intercambio de moléculas frías”	“pegajoso” hace parte de una propiedad de la viscosidad. Pero en todos los casos vemos que esta viscosidad sí afecta a la convección, aunque los grupos no muestren claramente de qué forma lo hace.
--	--	--

7.2.2 GUIA DE TRABAJO 2.

Preguntas realizadas	Respuestas dadas por los grupos	Análisis de las respuestas dadas
Con base en el experimento, ¿cómo creen ustedes que se confirma la existencia de capas en nuestro planeta?	-Grupo 1: “La existencia de estas capas se confirma gracias a las ondas que se forman al retumbar, luego se examinan las vibraciones provocadas y estas se registran en forma de capas” -Grupo 2: “Se podría argumentar que las ondas sísmicas son una clase de onda elástica fuerte en la propagación de perturbaciones temporales del campo de tensiones que generan pequeños movimientos en las placas tectónicas y esto mismo se evidencia en el experimento de la botella realizado en clase cuando la golpeábamos” -Grupo 3: “Si la tierra tuviese la misma composición hasta su interior se comportaría exactamente cómo se comportan otras ondas”	Los grupos presentan claridad en cuanto a las ondas como fuente principal en el conocimiento sobre las capas internas del planeta. Sin embargo, las respuestas dadas por los grupos muestran errores en torno a cómo se propagan las ondas. Por eso vemos argumentos como “ondas elásticas” o argumentos como “retumbar” que no son muy claros. Una mención a analizar vine dada por el grupo 3 en donde su respuesta no es muy clara no vincula con claridad el

	-Grupo 4: “Las ondas que se utilizan y sobre todo la forma de reacción de materiales y zonas en cuestión son las que determinan la variedad geotérmica y terrestre que puede poseer nuestro planeta”	experimento con la pregunta de la guía, pero se puede entender que, si la Tierra tuviese la misma composición interna, las ondas deberían registrar el mismo patrón, aunque allí no especifica el cómo llega a esa conclusión.
En el experimento, por medio de una fuerza, producíamos los diferentes patrones de onda, si hacemos una analogía en nuestro planeta ¿quién realizaría dicha fuerza? Explique.	-Grupo 1: “Esta fuerza es realizada por los movimientos sísmicos de las placas tectónicas, las cuales en todo momento están en constante cambio, pero no es algo evidente para nosotros. Otra fuerza aun mayor es cuando se dan los temblores, terremotos o tsunamis, que provocan una fuerza muy intensa y de gran magnitud” -Grupo 2: “Con base en lo visto en clase, puedo decir que la fuerza proviene del movimiento y choque entre placas tectónicas en lo profundo de nuestro planeta tierra” -Grupo 3: “Dicha fuerza la realizaría la gravedad, donde esta hace que gire constantemente hacia abajo” -Grupo 4: “La fuerza gravitatoria y el campo magnético son causantes de variabilidad frente a los elementos terrestres y son capaces de modificar los materiales densos de la Tierra”	Evidenciamos que los dos primeros grupos asocian la fuerza externa capaz de generar los patrones de intensidad registrados en el programa, como producto de la actividad sísmica. Esta idea va en concordancia con lo respondido en la primera pregunta de esta guía. El grupo 3 y 4 no presenta claridad en las respuestas, ya que vemos cómo este grupo (el 3) asocia la gravedad con un movimiento hacia abajo, aunque no especifica quién o qué gira hacia abajo o el último grupo en donde menciona el campo magnético pero no muestra una relación

		clara entre este y el procedimiento de laboratorio.
¿Se podría conocer con un alto grado de certeza los materiales dentro del planeta sólo con el estudio de ondas? Explique.	-Grupo 1: “No, pero existe un método para determinar una parte de los materiales que se encuentran al interior de la tierra y son las ondas sísmicas que ayudan a identificar ciertos componentes de nuestro planeta o realizar una hipótesis de lo que pueda haber” -Grupo 2: “Se podría decir que esto no es algo viable dentro del marco científico debido a que por medio de ondas únicamente no se lograría determinar con exactitud cómo nos indica la pregunta los materiales que se hayan dentro de nuestro planeta” -Grupo 3: “El único medio certero para conocer esto es por medio de las ondas sísmicas, se necesita una perturbación intensa para que el movimiento se transfiera a través de él” -Grupo 4: “Si, puesto que es gracias a la capacidad los materiales de recibir y captar ondas, que de esta manera podríamos experimentar acerca de la variedad de alteraciones que se pueden producir de una misma onda”	Aquí vemos que no se asocia con claridad el experimento realizado con la pregunta de la guía, ya que en este (el experimento) se logra visualizar las diferencias existentes entre un material y otro a través de la intensidad producida por la fuerza externa aplicada, solo el grupo 4 logra hacer la analogía. El grupo 1 en cambio presenta una pequeña contradicción ya que afirma que no se puede saber y después afirma que si por medio de las ondas, falta claridad en sus ideas pero está claro que se intenta explicar a partir de la actividad sísmica.
¿De qué otra forma creen que se podría obtener información sobre el interior terrestre?	-Grupo 1: “Esto se podría determinar mediante las ondas primarias que viajan a través del centro de la tierra y son detectadas al otro lado de esta,	Aquí ningún grupo dio respuesta diferente a las ondas sísmicas. Aunque se trata de dar explicación a la pregunta,

	brindando información del interior terrestre” -Grupo 2: “Mediante el método sísmico, el cual produce ondas que son Producidas en el hipocentro y se desplazan por los materiales que forman la tierra, también mediante observaciones topográficas y batimetría” -Grupo 3: “A través de distintas maneras por ejemplo el método sísmico que viene siendo un estudio indirecto en el que las ondas sísmicas se producen en el hipocentro y se desplazan a través de la materia que conforma Tierra” -Grupo 4: “Mediante la geológica, el uso de métodos investigativos sísmicos capaces de mostrar la composición básica terrestre, ya sea el núcleo o las placas tectónicas”	todos recurren al concepto de onda sísmica para dar solución al problema, podemos deducir que, para los estudiantes, solo las ondas pueden dar información sobre el interior terrestre.
Al formas capas, los materiales se someten a grandes presiones, ¿cómo creen ustedes que se relaciona el aumento de presión con las ondas en nuestro planeta?	-Grupo 1: “La presión que se ejerce en nuestra tierra y su aumento, influye en las ondas ya que estas pueden tener una variación un sus vibraciones y la representación no será exacta” -Grupo 2: “Creemos que el aumento de presión en relación con los materiales que forman nuestro planeta hace que las placas tectónicas, rocen, choquen o se sobrepongan una con otra, también hacen que los volcanes erupciones y los continentes se muevan, transformando la topografía de nuestro planeta”	En esta respuesta vemos que los estudiantes asocian a la presión con la parte externa del planeta, sin vincularlo con el interior que es donde están las capas, además vemos que, al pensar en la presión, se hace en torno a los bordes de las placas sin relacionarlo con el interior que era la pregunta problema, por tanto, el grupo

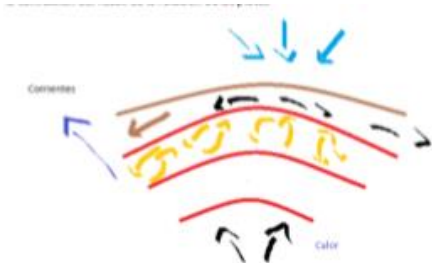
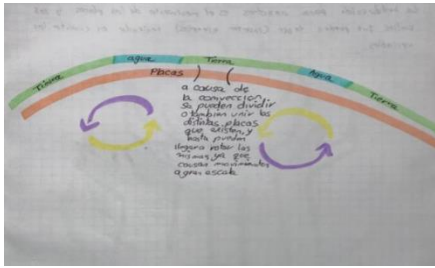
	-Grupo 3: “La presión ejercida por una superficie podría estar relacionada con radiaciones electromagnéticas la presión es la densidad del flujo de la energía” -Grupo 4: “Mayor presión ocasionada por las capas, significa que las ondas van a requerir ser modificadas en cuanto a su potencia para que se puedan esparcir por el medio”	no asoció la pregunta propuesta.
Nos dicen que el centro de la Tierra es líquido pero el resto sólido ¿cómo creen ustedes que lo saben? Explique.	-Grupo 1: “Se conoce que el centro terrestre es líquido gracias a las condiciones de presión que se llevaron a cabo en un laboratorio y se pudo determinar hace unos años que su temperatura era de 6.000°C. Del resto de las capas se pudo determinar su composición gracias a los movimientos sísmicos y más pruebas de laboratorio” -Grupo 2: “Saben que el centro de la tierra es liquido por medio de las ondas primarias, esto los hizo entender que el centro tenía dos capas, una sólida y una líquida, creemos que es posible por los múltiples estudios hechos desde los años 30” -Grupo 3: “El núcleo externo es líquido debido a las altas temperaturas en esa región (6000°C) y el interno es sólido debido a que se encuentra a una presión extrema “	En esta última parte evidenciamos que los grupos dan respuesta en torno a fuentes externas y no por el análisis hecho por cada uno de los integrantes, por eso observamos respuestas como “se conoce que, se sabe que etc.” además evidenciamos que el grupo 3 sólo da una descripción del interior terrestre sin responder realmente la pregunta original u observamos al grupo 4 donde no da respuesta sobre el fenómeno sino da respuesta de cómo se llega a saber que el fenómeno está allí, quizás en estos grupos no se entendió

	-Grupo 4: “Esto es posible gracias a las ondas, puesto que permiten averiguar la composición de un objeto sin tener visión, es gracias a la forma en que este interior reacciona y modifica una onda que podemos determinar materiales”	con claridad la pregunta propuesta.
--	---	-------------------------------------

7.2.3 GUIA DE TRABAJO 3.

Preguntas realizadas	Respuestas dadas por los grupos	Análisis de las respuestas dadas
¿Sin fuente de calor, podrían moverse las placas? Explique.	-Grupo 1: “Sin algún tipo de fuente de calor, sería imposible tener un movimiento por parte de las placas tectónicas, ya que gracias a que el manto este expuesto a altas temperaturas se genera un movimiento ascendente y cuando estas temperaturas se reducen el manto se hunde, causando así el movimiento continuo de las placas, por lo que no tener fuente de calor suspendería todo el movimiento” -Grupo 2: “No, puesto que, aunque las placas son rígidas, se mueven de rebote, por el calor que desprende el interior de nuestro planeta, moviendo el manto y en consecuencia se expande a la litosfera y la corteza terrestre” -Grupo 3: “Sin fuente de calor no se podrían mover las placas porque la parte del manto al calentarse asciende y al enfriarse se hunde, al repetir este proceso se genera un movimiento, que es el causante del movimiento de las placas tectónicas” -Grupo 4: “Lo más seguro es que no sea posible, dado que los movimientos de las placas se	Todos los grupos presentan de manera unánime la imposibilidad del movimiento de placas sin una fuente de calor como la hay en nuestro planeta. Vemos entonces que existe una claridad en torno a la relación existente entre ambas variables(calor y movimiento) debemos añadir que la explicación dada para esta parte ya está en torno a la convección, lo vemos en la forma como los grupos describen la fuente de calor, con

	dan porque el núcleo de la tierra necesitas liberar la presión que genera el calor”	ascenso o descenso de material.
¿Cómo piensan que la convección mueve las placas?	-Grupo 1: “En sí, la convección es el calor que se transmite a otra sustancia. Las corrientes de convección se dan como el resultado de un calentamiento por gradientes de temperatura. Esta convección da paso a una serie de terremotos y erupciones volcánicas gracias a la opresión de placas que se ejercen debido a las altas temperaturas que se generan, dando a su paso el movimiento de las placas tectónicas” -Grupo 2: ” La litosfera se divide en una serie de placas que están continuamente creándose y consumiéndose en sus límites de placa opuestos, dando paseo a la producción de medida que el manto se agrega a los bordes de crecimiento de una placa, Este material añadido caliente se enfría por conducción y convección de calor, entonces en los bordes de la placa, el material se ha contraído térmicamente hasta volverse denso, hundiéndose bajo su propio peso en el proceso de subducción, generalmente en una fosa oceánica” -Grupo 3: “Las corrientes de convección son el resultado de un calentamiento por gradientes de temperatura. La convección también juega un papel importante en el movimiento de aguas oceánicas profundas y contribuye a la formación de corrientes oceánicas. Los movimientos de convección del manto dentro de la Tierra son la causa de los movimientos de opresión de las placas tectónicas, dando como resultado eventos tales como terremotos y erupciones volcánicas” -Grupo 4: “Por la intervención del calor, la gravedad y no menos importante la presión”	En esta pregunta vemos que los diferentes grupos presentan respuestas variadas, pero en ningún caso dan respuesta al interrogante propuesto, esto puede significar que no se comprendió la pregunta, los grupos dan una descripción de la convección y tratan de vincularlo con los procesos dados en las placas, pero no dicen cómo esas corrientes podrían mover las placas.

¿Podría la convección dar razón de la rotación de las placas? Realice un dibujo mostrando como cree usted que son esas corrientes.	-Grupo 1: “Si ya que esto da paso a que las placas tectónicas se presionen entre sí, quedando una debajo de otra generando un movimiento rotativo que posteriormente se convertiría en trincheras oceánicas de gran profundidad o erupciones volcánicas masivas” -Grupo 2: “Las corrientes de convección son el resultado de un calentamiento por gradientes de temperatura, por eso se cree que los movimientos de convección del manto dentro de la Tierra son la base de los movimientos de opresión de las placas tectónicas” -Grupo 3:  -Grupo 4: Dibujo Realizado por el grupo 	Aquí evidenciamos que los grupos intentan dar explicación del fenómeno por medio de celdas convectivas propuestos por Rayleigh-Bénard. Pequeñas corrientes arrastran la placa, pero sin decir nada acerca de la rotación de las placas, falta por tanto profundizar sobre la respuesta (o imágenes) dadas por los diferentes grupos.
¿Creen ustedes que son suficientes las corrientes	-Grupo 1: “Probablemente no ya que se deben ver otros factores como lo serian la presión, los	Para esta pregunta vemos que los grupos presentan

de convección para mover las placas?	materiales que hay en esas zonas, las temperaturas el grosor de las capas, etc. Hay que evaluar diversos campos que influyen en este movimiento, si solo nos quedamos con la convección puede que, si se muevan las placas, pero se dará de una forma errónea y la tierra probablemente no sería habitable para los seres humanos” -Grupo 2: “Si, las corrientes de convección si bien tienen la capacidad de generar los movimientos de opresión de las placas tectónicas también podrían ser suficientes como para influir en el movimiento de las placas” -Grupo 3: “Muchos geólogos piensan que la fuerza de las corrientes de convección no es suficiente para empujar placas de gran tamaño, es por esto que se piensa que la gravedad es la principal fuerza ya que, en las zonas de subducción al hundirse la litosfera oceánica en el manto, arrastra consigo al resto de la placa con ella” -Grupo 4: “Si y no, puede que se pueda aplicar una fuerza completamente externa que puede ayudar a que se genere este movimiento.”	argumentos en donde no es tan clara su postura en torno a la capacidad de las corrientes convectivas para mover las placas. Por eso encontramos respuestas como “probablemente” o “si y no” lo que si presentan con certeza es que las corrientes de convección generan movimiento, pero puede que no sea lo único que lo haga, en este caso se debe profundizar más sobre aquellas variables implicadas en la tectónica de placas.
¿Cómo creen ustedes que funciona la subducción?	-Grupo 1: “La subducción es un fenómeno o proceso en donde una placa litosférica oceánica se hunde bajo otra placa quedando en la zona inferior de esta. Todo esto es causado gracias a las fuerzas tectónicas debido a un empuje que se da en las dorsales meso oceánicas, que dan paso al proceso de la subducción” -Grupo 2: “La placa que se hunde, suele estar formada por corteza oceánica, más delgada y densa que la continental y por esto suele desplazarse por debajo de la corteza continental”	Los grupos realizan la descripción del fenómeno de subducción y dan definiciones en torno a él. Ya hay claridad en cuanto al movimiento, esto es así ya que en el aula se realizan las diferentes discusiones en torno al

	-Grupo 3: “La subducción es un proceso que impulsa el movimiento de las placas tectónicas de la Tierra. Los lugares donde estas placas se encuentran se llaman límites de placas, los cuales se producen cuando las placas se separan, se deslizan una al lado de la otra o chocan entre sí” -Grupo 4: “La superficie para poder llevar calor absorbe para ubicarlo debajo de la tierra.”	fenómeno y se realizan lecturas para la comprensión del fenómeno subductivo.
¿Cómo creen que sería nuestro planeta sin este proceso geológico?	-Grupo 1: “Sería un planeta probablemente plano, en donde no existirían montañas, cordilleras o volcanes que le den una estructura sólida y única a nuestro planeta” -Grupo 2: “Para empezar no existirían los continentes que se tienen actualmente, y en si sería un mundo muy distinto porque no se tendría la organización actual hablando de las distintas capas de la tierra, inclusive podría ser inhabitable en un punto debido a que este es proceso se encarga de que los volcanes existan y que todo lo que debe expulsarse sea expulsado por este método, si fuera diferente la lava en cierto punto no tendría control alguno” -Grupo 3: “Sin el proceso de subducción la tierra sería un lugar caliente e deshabitado como por ejemplo Venus. Sin la subducción no se podría controlar la distribución y la fragmentación de las placas tectónicas” -Grupo 4: “No habría movimientos telúricos y también no existirían lo que hoy se conoce como cordilleras, montañas y relieves terrestres, todo sería una llanura.”	En esta última parte los grupos ya presentan claridad en cuanto al efecto de la subducción en el entorno natural. Aunque hay que hacer algunas aclaraciones en torno a los continentes ya que estos están encima de las plataformas continentales y no es la subducción la que los crea, sin embargo, la subducción si hace posible el movimiento telúrico y si es la responsable de la creación de cordilleras. Debemos resaltar sin embargo la respuesta del

		grupo 3, en este caso el grupo afirma que la subducción es la responsable de controlar la fragmentación de las placas, vemos por tanto que asocian la subducción a la fragmentación sin mostrar el efecto de esta en el entorno.
--	--	---