



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

PRODUCCIÓN DE CALOR RADIOGÉNICO Y FLUJO DE CALOR EN LAS ROCAS
DEL BASAMENTO DE LA CUENCA DE TALCA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

CRISTIAN ANDRÉS MORALES MOLINA

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL ÁNGEL PARADA REYES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DIEGO MORATA CESPEDES
MAURICIO MUÑOZ MORALES

Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes a través del proyecto CONICYT/FONDAP/15090013, Subsecretaría de energías del Ministerio de Energías de Chile.

SANTIAGO DE CHILE
MAYO 2014

Resumen

En este trabajo se presenta una estimación del flujo de calor HF (por sus siglas en inglés Heat Flow) para la cuenca de Talca ($35^{\circ} 25' 59''$ S, $71^{\circ} 40' 0''$ W), a partir de la medición de la producción de calor radiogénico RHP (por sus siglas en inglés Radiogenic Heat Production) de las rocas perteneciente a la corteza superior, esencialmente afloramientos mesozoicos y cenozoicos. Considera por parte de la literatura, el RHP del resto de la corteza y el manto litosférico, así como el flujo de calor derivado por la diferencia de temperatura entre la base de la litósfera y la superficie.

Se estimó el RHP de las rocas de la corteza superior en base a la concentración de U, Th y K en ellas mediante un espectrómetro/escintilómetro portátil de rayos gamma, los datos para el resto de la litósfera y las propiedades físicas de las rocas fueron obtenidas de la literatura. Para la estimación del HF se utilizó modelación de elementos finitos sobre un perfil estructural de la cuenca, en el cual se incluyen las propiedades físicas, RHP y temperaturas bordes de la litósfera. El programa utilizado para la modelación fue el software COMSOL Multiphysics (versión 4.3a).

El RHP de las formaciones de la corteza superior varía desde $0,4 \mu W/m^3$ a $2,8 \mu W/m^3$, teniendo como media una producción de calor radiogénico de $1,3 \mu W/m^3$.

El HF estimado por el modelo para la cuenca de Talca es de entre $62-65 mW/m^2$ de los cuales $15 mW/m^2$ son producidos en la corteza superior siendo un 23 % del flujo de calor que llega a la superficie. El gradiente térmico estimado bajo Talca corresponde a $23 ^{\circ}C/km$.

A mis Padres Héctor y Bernardita, Profesores.

A mis hermanos Héctor, Juliette y Daniel

A mi hijo Salvador

Agradecimientos

Agradezco a la División de energías renovables del Ministerio de Energías de Chile, al CEGA (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes), al departamento de Geología de la Universidad de Chile, por el financiamiento de este trabajo, a mi profesor guía M.A. Parada, al profesor co-guía D. Morata y al profesor co-guía Mauricio Muñoz, por su ayuda en la realización de este trabajo. Además agradezco a Patricio Bravo por facilitarme su memoria en formato digital de la geología oriental de Talca, que fue de gran ayuda. A María Rosa y a la Blanca, por su ayuda y guía en cuanto a los procesos de la U. A la gente de la U, el Quilo, Don Carlos y el Carlos, La Rosita; los del lab El Jaime, Roberto y Julio.

A mis padres que dedicaron (y dedican su vida) a nosotros sus hijos y nos dieron toda la libertad de estudiar lo que quisiéramos.

A los amigos de Bachi, Blanca, Guallo, Quintanilla, la Clau y Vitoco. A los amigos de Ñoñef: Carlitos, Jacques, Franky, Miguelin, Manelo, Andres (y como olvidar Yungay) , La Jajo (y su perseverancia) a la Cata Carreño (y su gran amistad), los bocaseca: Vladis, Yerko, Pelao, Guga; a los compipas de curso: el Joe, la Vale, la Moyra, la Mari, al Quiroga. A la Rose y la chica (Nicole Lara).La gente de la office, la Vale flores, al Nico (np) ,la Cryspi (cristina Brantt), el Pablo 9garat y el Ferran; para el Diegol y su introducción al COMSOL. Para mi Barbarita linda que me acompañó y maravillo en esta última etapa en la U :) .A algunos profes que me inspiraron como Cristian Reyes, Italo Saturnino Fuentes (Maese Vitulus), Jorge Soto. En geo, nuevamente al profesor Parada, al Cesar, a Jacobus y a todos los profesores de la Universidad de Chile que hacen investigación. A Los que me acompañaron en terreno, el Dieter, al Seba (y un accidente piola) y a la Fran Parada. y a todos los geólogos con los cuales hice mis variadas practicas, en especial a Cesar Montenegro, Mario Laguna, Aldo Vasquez y la Pajara por enseñarme de geología y un poco mas. Quiero agradecer a todos los que me acompañaron en esta (larga) etapa de mi vida, lamento no mencionarlos a todos (son bastantes), pero sus recuerdos, ayuda y cariño permanecen.

Y muchas gracias al departamento de Geología y a la U de Chile que fueron mi hogar durante estos años (y espero que de cierta manera lo sigan siendo).

Y por último a los grandes (para mi). Charles Darwin, Carl Sagan, Isaac Asimov, J.R.R. Tolkien y a todos los soñadores que compartieron sus sueños.

ƁHIKHI↑Ǝ↑ƎHI↑ƎRIƎMMN††IƎƎJMJMRIƎMRKIM††IƎKƎ

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Exposición del problema	2
1.2. Ubicación y vías de acceso	2
1.3. Clima y vegetación	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivos generales	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Hipótesis de trabajo	5
1.6. Plan de trabajo	5
2. Marco Geológico	6
2.1. Rocas Metamórficas	6
2.1.1. Basamento Metamórfico (Bm)	6
2.2. Rocas Estratificadas	6
2.2.1. Triásico Superior-Jurásico inferior (Tr)	6
2.2.2. Formación Altos de Hualmapu (Jmah)(Morel, 1981)(Bravo, 2001) . .	7
2.2.3. Formación La Lajuela (Klaj)(Bravo, 2001)	7
2.2.4. Formación Estratos de El Laurel (Bravo, 2001)	7
2.2.5. Ignimbritas del Cerro Caupolicán (Bravo, 2001)	8
2.2.6. Estratos de Litú (Klit)(Bravo, 2001)	8
2.2.7. Estratos de El Culenar (Kcul)(Bravo, 2001)	8
2.2.8. Formación Abanico (OMa)(Aguirre, 1960)(González y Vergara, 1962)	9
2.3. Rocas Intrusivas	9
2.3.1. Basamento Granítico (Bg)	9
2.3.2. Batolito Andino	9
2.4. Depósitos Cuaternarios	10
2.4.1. Depósitos Fluviales y Aluviales (Q)(Hauser, 1995)	10
2.4.2. Depósitos Piroclásticos (Pl3)(Hauser, 1995)	10
2.5. Estructuras	10
2.5.1. Falla Pocuro - San Ramón	11
2.5.2. Falla Los Ángeles - Infiernillo	11
2.5.3. Falla Litú	11
3. Metodología	13
3.1. Perfil Estructural	13
3.2. Producción de calor radiogénico	13

3.2.1.	Producción de calor radiogénico en rocas	14
3.2.2.	Medición con espectrómetro de rayos gamma	14
3.2.3.	Tratamiento de los datos	17
3.3.	Propiedades termales de las rocas	17
3.3.1.	Capacidad Calorífica (C_p)	17
3.3.2.	Conductividad Termal (k)	18
3.4.	Densidad de las rocas	18
3.5.	Modelo de transferencia de calor en sólidos con elementos finitos	18
4.	Antecedentes	20
4.1.	Litología y propiedades físicas de las rocas	20
4.1.1.	Corteza superior	20
4.1.2.	Corteza media	21
4.1.3.	Corteza inferior	22
4.1.4.	Manto litosférico	22
4.1.5.	Conductividad termal (k)	23
4.1.6.	Capacidad calórica a presión constante (C_p)	23
4.1.7.	Producción de calor radiogénico en la litósfera	24
4.1.8.	Densidad de las rocas	24
4.2.	Perfil estructural	25
5.	Resultados	33
5.1.	Producción de calor radiogénico	33
5.1.1.	Producción de calor radiogénico de la corteza superior	33
5.2.	Rocas Metamórficas	34
5.2.1.	Basamento Metamórfico (Bm)	34
5.3.	Rocas Estratificadas	35
5.3.1.	Triásico superior-Jurásico inferior (Tr)	35
5.3.2.	Formación Altos de Hualmapu (Jmah)	35
5.3.3.	Formación Estratos del Laurel (Klau)	36
5.3.4.	Ignimbritas de Cerro Caupolican (Kcc)	37
5.3.5.	Formación Estratos de Litú (Klit)	38
5.3.6.	Formación Culenar (Kcul)	39
5.3.7.	Formación Abanico (OMa)	40
5.4.	Rocas Intrusivas	43
5.4.1.	Basamento Granítico (Bg)	43
5.4.2.	Intrusivo Jurásico (Jig)	43
5.4.3.	Intrusivo Cretácico (Kiag)	44
5.5.	Distribución de concentraciones de elementos productores de calor radiogénico (RHPE)	46
5.6.	Razones Th/U y K/U y su distribución espacial	51
6.	Modelamiento del flujo de calor mediante elementos finitos	55
6.1.	Input de datos	55
6.2.	Descripción de la malla	58
6.3.	Condiciones de borde	60
6.4.	Resultado de modelo de flujo de calor	63

7. Discusiones	67
7.1. Elementos radiogénicos U, Th, K	67
7.2. Producción y flujo de calor	69
7.3. Modelación	69
8. Conclusiones	72
8.0.1. Elementos Productores de Calor Radiogénico (RHPe)	72
8.0.2. Producción de calor radiogénico (RHP)	72
8.0.3. Flujo de Calor	73
8.0.4. Gradiente termal	73
8.0.5. Implicancias para el uso directo de la geotermia de muy baja entalpía	73
Bibliografía	74

Índice de tablas

3.1.	Tabla para el cálculo de error estadístico, considera solo valores de ± 1 sigma por ser una muy buena estimación. Cálculo del error mediante la fórmula $Error_{U,Th,K} = \sqrt{(\sigma_U)^2 + (\sigma_{Th})^2 + (\sigma_K)^2}$.	16
4.1.	Valores referenciales de k (He et al., 2009)	23
4.2.	Tabla resumen C_p capacidad calorífica.	23
4.3.	Valores referenciales de RHP y k (modificado de He et al. (2009))	24
4.4.	Tabla resumen ρ es la densidad promedio de la formación.	24
5.1.	Resumen datos para: Basamento Metamórfico	34
5.2.	Resumen datos para: Triásico-Jurásico	35
5.3.	Resumen datos para: Altos de Hualmapu	35
5.4.	Resumen datos para: Estratos del Laurel	36
5.5.	Resumen datos para: Ignimbritas de Cerro Caupolican	37
5.6.	Resumen datos para: Estratos de Litú	38
5.7.	Resumen datos para: Culenar	39
5.8.	Resumen datos para: Abanico	40
5.9.	Resumen datos para: Basamento Granítico	43
5.10.	Resumen datos para: Intrusivo Jurásico	43
5.11.	Resumen datos para: Intrusivo Cretácico	44
6.1.	Tabla resumen de propiedades físicas de las rocas. Donde RHP es la producción de calor radiogénico, ρ es la densidad promedio de la formación, C_p es la capacidad calorífica y k es la conductividad térmica.	55
6.2.	RHP Resumen	57

Índice de figuras

1.1. Área de estudio, cuenca de Talca, destacada dentro de la cuadrícula roja. Limitada al norte por el río Claro, al sur por el río Maule, al este por la Cordillera de los Andes y al oeste por la cordillera de la Costa.	3
2.1. Mapa geológico de la cuenca de Talca.	12
3.1. Espectrómetro/escintilómetro de rayos gamma portátil RS-125, de Radiations Solutions. Realiza conteo de rayos gamma mediante un detector de Sodio-Yodo que responde a energías de entre 30KeV-3.000KeV en 1.024 canales.	15
3.2. Espectro típico de rayos gamma, mostrando las ventanas de energía convencionales. Peaks de 1,461 Mev para el Potasio, 1,765 MeV para el U y 2,615 MeV para el Torio	16
4.1. Modelo de extensión a través de una falla de piso levemente inclinada. Desarrolla un graben asimétrico con un arreglo interno de una falla lístrica principal y un sistema de bloques rotados. (McKlay y Ellis, 1987, en (Bravo, 2001)). .	25
4.2. Desarrollo de un modelo estructural a partir de un perfil gravimétrico en la cuenca de Santiago.(López, 2008)	26
4.3. Interpretación estructural del sector oeste de la Cordillera Principal a la latitud de Santiago, asociada al manteo al este de la falla de San Ramón de geometría rampa-flat (Armijo et al., 2010)	27
4.4. Imagen sísmica del Maule entre los 34.5°S y 38°S, perfil obtenido por la inversión conjunta de refracción / reflexión y enmascarado por las trayectorias de las ondas sísmicas. El tiempo residual global del modelo es 0,103 ms ($x^2 = 1,1$)(Moscoso et al., 2011)	27
4.5. Perfil de refracción de ondas sísmicas desde los 36°S hasta los 37°S de los proyectos ISSA y SPOC (modificado de Lüth et al. 2003a, 2003b; Krawczyk y el equipo SPOC 2003). En color las velocidades de ondas P en <i>km/s</i> . (Krawczyk et al., 2006)	28
4.6. Columna estratigráfica en la zona del perfil 1, modificada de(Bravo, 2001). .	29
4.7. Perfil estructural propuesto para la cuenca de Talca y Penciahue, hasta el manto litosférico.	30
4.9. Perfil estructural propuesto para la cuenca de Penciahue. Corteza superior. .	31
4.8. Perfil estructural propuesto para la cuenca de Talca. Corteza superior.	32

5.1.	Concentración de uranio en cada punto de medición (puntos de color). Las áreas coloreadas corresponden a la mediana de las concentraciones calculada por formación.	47
5.2.	Concentración de torio en cada punto de medición (puntos de color). Las áreas coloreadas corresponden a la mediana de las concentraciones calculada por formación.	48
5.3.	Concentración de potasio en cada punto de medición (puntos de color). Las áreas coloreadas corresponden a la mediana de las concentraciones calculada por formación.	49
5.4.	Producción de calor radiogénico (RHP) en cada punto de medición (puntos de color). Las áreas coloreadas corresponden a la mediana del RHP calculada por formación.	50
5.5.	Relación Th/U para cada formación, se observa que en promedio todas las rocas están empobrecidas en U, $Th/U = 4$ es la media mundial	52
5.6.	Relación K/U para cada formación, se observa que en promedio todas las rocas están empobrecidas en U $K/U * 10^4$ es la media mundial	53
5.7.	Producción de calor radiogénico en perfil por parte de cada unidad geológica.	54
6.1.	Malla del perfil de roca utilizado, para la modelación de transferencia de calor en sólidos, mediante elementos finitos.	58
6.2.	Calidad de los elementos finitos utilizados en la modelación de la transferencia de calor a través de la litósfera bajo la cuenca de Talca, 1 como máxima simetría y 0 como mínima.	59
6.3.	En azul temperatura en la superficie, corresponde a la media anual de $13^{\circ}C$	60
6.4.	En azul, temperatura en la base de la litósfera, sigue la siguiente ecuación $560,15 - y * 0,013$, con temperaturas entre $940^{\circ}C$ y $1.070^{\circ}C$	61
6.5.	En azul, aislamiento térmico en los bordes del sistema, esto quiere decir flujo de calor igual a 0 en el componente x.	62
6.6.	Perfil de flujo de calor en la cuenca de Talca, con un máximo de $65,5 mW/m^2$.	64
6.7.	Isolíneas de temperatura, con condiciones de borde de $13^{\circ}C$ en la superficie y en el borde inferior se utilizó la siguiente ecuación $560,15 - y * 0,0132415$ donde y es la profundidad, esto debido a que la temperatura no es la misma en todo el borde inferior.	65
6.8.	Gradiente de temperatura resultante de la modelación, para la corteza superior se estima un gradiente de $23^{\circ}C/km$, para la corteza media e inferior, un gradiente de $18^{\circ}C$ y de unos $15^{\circ}C/km$ para el manto litosférico.	66
7.1.	Distribución de las muestras según su contenido de U(ppm), Th(ppm) y K(%).	68
7.2.	Distribución de las muestras según su contenido de U(ppm), Th(ppm) y K(%), compilación mundial realizada por Vilà (2012).	68
7.3.	Comparación de tres flujos de calor. En verde el flujo de calor producido únicamente por la diferencia de temperatura entre la base de la litósfera ($1.000^{\circ}C$) y la superficie ($13^{\circ}C$); en rojo el flujo de calor debido a la diferencia de temperatura entre la base de la litósfera y la superficie sumado al RHP del manto litosférico ($0,02\mu W/m^3$), la corteza inferior ($0,37\mu W/m^3$) y la corteza media ($0,87\mu W/m^3$); finalmente en azul el flujo de calor total en la superficie debido a la diferencia de temperatura entre la base de la litosfera y la superficie y el RHP del manto litosférico, la corteza inferior, media y superior.	71

Capítulo 1

Introducción

Actualmente no existen en Chile, en especial en el área de estudio, Región del Maule, mapas o información detallada del flujo de calor en superficie, las estimaciones actuales se basan en extrapolaciones realizadas a partir de pocos datos tomados en pozos cercanos a fuentes de calor conocidas y a mediciones realizadas en las dorsales oceánicas, lo cual deja un sesgo en la extrapolación al resto del territorio. Estas estimaciones para la zona de estudio van desde los 40 mW/m^2 hasta los 80 mW/m^2 , aunque haciendo estimaciones un poco más moderadas, se establece un rango de $60\text{--}70 \text{ mW/m}^2$ (Springer, 1999) (Hamza et al., 2008). En los continentes existen pequeñas regiones con un alto flujo calórico, en donde se han realizado un gran número de mediciones, esto eleva el promedio de flujo calórico, para la corteza continental. Cuando se excluyen regiones con alto flujo calórico o se ocupan métodos para tener una estimación representativa del promedio del flujo calórico en la corteza continental, sacando promedios ponderados por áreas o sacando datos promedios por áreas geológicas ambos métodos llegan a valores idénticos de 64 mW/m^2 para flujo calórico promedio en la corteza continental (Mareschal y Jaupart, 2012). Lo más cercano a la zona de estudio son mediciones realizadas en la mina La Africana con $79 \text{ mW/m}^2(33^\circ\text{S})$ y en la mina Disputada de las Condes con $61 \text{ mW/m}^2(33^\circ\text{S})$ (Uyeda y Watanabe, 1982). Hay que tomar en cuenta de que la zona de estudio es estable tectónicamente (las fallas principales están los bordes de la cuenca), relativamente alejada de zonas de alto flujo de calor, tales como volcanismo activo o margenes divergente de placas, las rocas son principalmente del cretácico inferior (90 Ma aproximadamente, por lo cual ya estarían en equilibrio térmico), de esta manera el flujo de calor puede ser explicado por la producción de calor propia de la litosfera y del calor recibido en la base en el límite con la astenosfera.

La falta de datos en parte se debe a que la forma directa de medir flujo de calor es mediante pozos profundos (el flujo de calor es igual al gradiente térmico por la conductividad térmica de la roca), lo que requiere tiempo y dinero. En este trabajo se presenta una alternativa, mediante la medición de la producción de calor de las rocas que componen el basamento de la cuenca de Talca, se estimará el flujo de calor resultante, esto implica conocer las distintas fuentes de calor y la estructura del basamento.

1.1. Exposición del problema

La baja entalpía generalmente no presenta manifestaciones superficiales o están acotadas a fuentes termales de baja temperatura con fines recreativos, lo cual impide a priori identificar fácilmente áreas de interés geotérmico y su cuantificación, por otro lado las zonas de exploración se enmarcan entorno a fuentes geotérmicas de alta entalpía, tales como volcanes y geiseres, por su fácil identificación en terreno. Un mapa de flujo de calor, se puede hacer de manera directa, mediante la perforación de pozos en los cuales se mide la conductividad de las rocas y el gradiente de temperatura, pero esto implica grandes costos y tiempos; para una manera más práctica, se pueden identificar las diversas fuentes de calor en un sector y las conductividades de las rocas presentes, pudiendo determinar un flujo de calor de gran certeza. Las fuentes de calor que se pueden tener en la Tierra son: radioactivo (principal), calor original (acreción, elementos radiactivos de corta vida ^{26}Al , diferenciación de Fe), mareas terrestres, fricción, convección del manto, liberación de calor latente. La suma de todos estos factores determinan el calor en superficie, pero el que debemos considerar por su importancia es el calor radiactivo, siendo la producción de calor en la litosfera alcanza entre 30 % y 40 % (Hasterok y Chapman, 2011) del flujo de calor que escapa a través de la superficie. Por ello en este trabajo se abordara la producción de calor radiogénico RHP (por sus siglas en inglés, también a veces en la literatura se nombra como HG, por sus siglas del inglés Heat Generation) para poder entender el flujo de calor HF (por sus siglas en inglés). El calor radiogénico es producido por la desintegración de elementos radiactivos, de los cuales gran parte de la energía liberada se transforma en calor, los elementos productores de calor radiogénico RH-Pe (por sus siglas del inglés Radiogenic Heat Production elements), de importancia geológica son el U, Th y K, de los cuales el U controla cerca del 85 % del aporte calórico (Vilà et al., 2010).

1.2. Ubicación y vías de acceso

El área de estudio se ubica en la VII Región del Maule, se enmarca entre el borde oriental de la Cordillera de la Costa y el borde occidental de la Cordillera Principal, entre los 35° y 35° 45' de latitud sur, Entre el río Claro por el norte y el río Maule por el sur, cubriendo una extensión aproximada 5.500 km². El principal centro urbano, es la ciudad de Talca. La vía principal al área de estudio es la ruta 5 Sur y sus caminos laterales. Las distintas rutas utilizadas para tomar mediciones fueron:

Cordillera Principal: Sur del Embalse Colbún: Desde Talca tomar ruta 5 al sur por 15 km, luego un desvío hacia Colbún por la ruta L-11 por 35 km, finalmente en la ruta L-391 se realizó las mediciones. Los Montes: Desde Talca tomar ruta internacional 115 hacia el este, por 35 km, luego seguir ruta K-595, las mediciones fueron hechas en las rutas k-589 y k-705. Quisería-Los Treiles: Desde Talca tomar ruta internacional 115 hacia el este, por 30 km, luego seguir la ruta K-25 por 8 km, luego seguir por la ruta K-53 por 10 km hasta la ruta K-235 en donde se encuentran las muestras. Desde el inicio de la ruta K-25, seguir por 20 km hacia el norte donde también se ubican otras mediciones.

Cordillera De la Costa: Villa Prat: Desde Talca por la ruta 5 hacia el norte por 20 km, hasta San Rafael, Luego tomar la ruta K-40 hasta Villa Prat, seguir por 3 km al norte por la ruta K-16, hasta el lugar de mediciones. La Aguada-Cerro Grande-Mina Las Palmas: Desde Talca hacia el Nornoroeste por la ruta K-520, por 10 km ruta en la que se tomaron varias medidas, seguir al norte por la ruta K-412 donde se realizaron mediciones, más al norte, se encuentran las rutas K-195, K-410 y K-420, donde también se realizaron mediciones. Lo Figueroa-Pencahue-Curtuduria: Desde Talca hacia el oeste por la ruta K-60 se toman varias mediciones por cerca de 20 km, hacia Curtuduria, tomar la ruta K-650 a la altura de Lo Figueroa, luego de 15 km seguir por la ruta K-660. Maule-Colin: Desde Talca hacia el suroeste, por las rutas K-610, K-630, K644 y K-636.

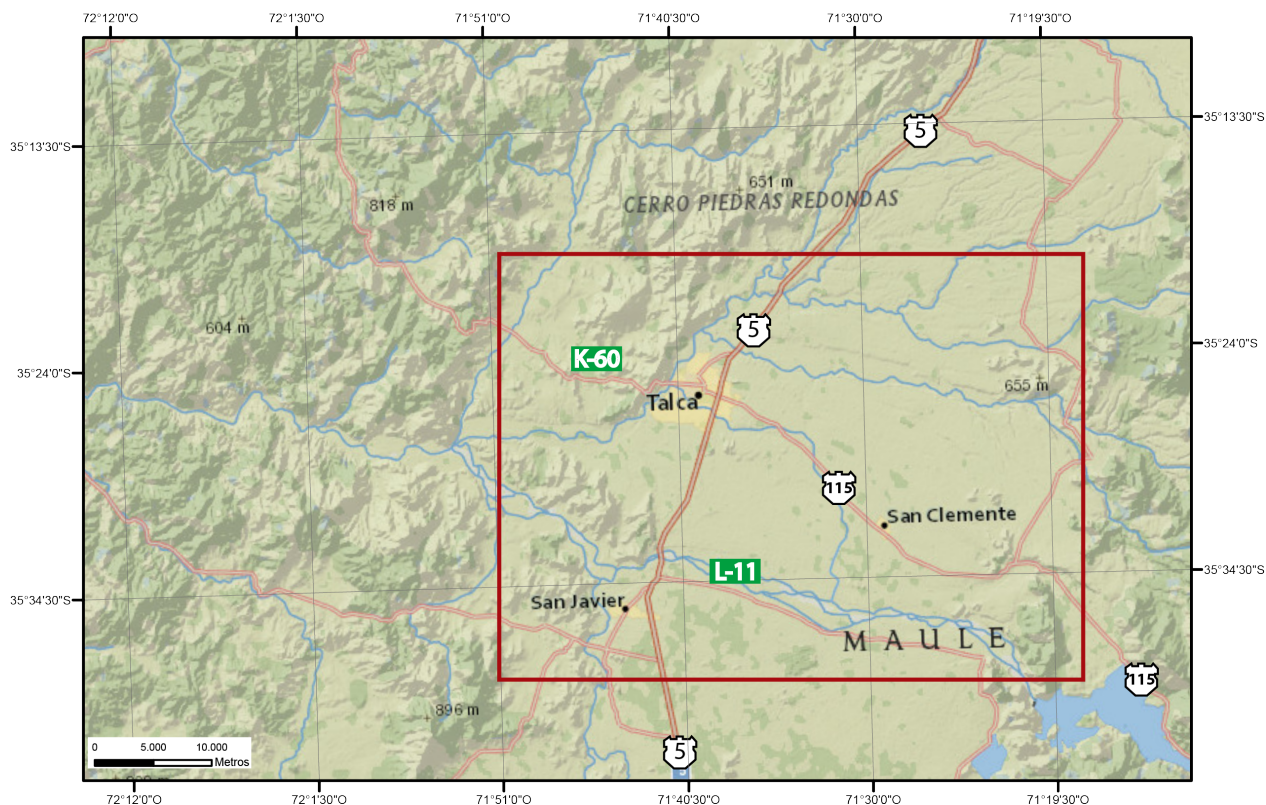


Figura 1.1: Área de estudio, cuenca de Talca, destacada dentro de la cuadrícula roja. Limitada al norte por el río Claro, al sur por el río Maule, al este por la Cordillera de los Andes y al oeste por la cordillera de la Costa.

1.3. Clima y vegetación

Debido a la menor elevación que alcanzan en esta Región ambas cordilleras, no son suficientes para definir climas claramente diferentes en las zonas que ocupan, en la VII Región se ha identificado un solo tipo climático, que corresponde al templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses, aunque las diferencias de relieve y de latitud en la Región definen diferencias apreciables en los montos anuales de agua caída y en la duración de estación seca.

En esta Región, las precipitaciones son casi exclusivamente de origen frontal y más abun-

dantes en invierno. El total de las precipitaciones entre mayo y agosto alcanza al 70 % a 75 % del total anual, lo que indica que en estas latitudes las precipitaciones que no son invernales alcanzan ya cierta importancia. Entre octubre y marzo ocurre la estación seca, que se prolonga por 4 hasta 6 meses, en que llueve menos de 40 mm mensuales. En el invierno se presentan intensas nevadas en la cordillera que se constituyen en importantes reservas hídricas para la temporada estival y definen el desarrollo de los sistemas fluviales de la zona.

El monto anual de precipitación, que en la costa superan los 800 mm., como en Constitución y el Cabo Carranza, disminuyen a 700 mm. en Cauquenes, al lado oriental de la Cordillera de la Costa; aumentan nuevamente a 720 ó 730 mm. en Curicó y Talca, superan los 1.000 mm en Linares y Panimávida y los 2.500 mm en la alta cordillera. Las temperaturas medias anuales varían entre unos 13°C y 15°C, observándose algunos sectores como Talca, con temperaturas mayores a las de Santiago, en especial en verano. Los valores menores de temperatura media corresponden a la franja costera y la cordillera y los valores mayores se presentan en la depresión intermedia.

La cercanía del océano y la continentalidad también determinan diferentes niveles de amplitud térmica. La diferencia térmica entre el mes más cálido y el más frío es de 5°C a 7°C en la costa (Constitución y Punta Carranza), en cambio alcanza los 13°C en Curicó y Cauquenes y 14°C en Talca y Linares. También la oscilación térmica diaria es desigual: la diferencia media entre las máximas y las mínimas es inferior a 11°C en Constitución y supera los 14°C en Curicó y Talca. (Dirección Meteorológica de Chile, 2010).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos generales

Determinar el flujo de calor que llega a la base del relleno sedimentario en la cuenca de Talca, a partir de la producción de calor, propiedades físicas de las rocas y la estructura de la litósfera.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la estructura de las rocas en la litósfera.
- Determinar propiedades físicas de las rocas.
- Estimar la producción de calor a partir de la desintegración de elementos radiogénicos.
- Estimar la estructura termal de la litósfera por medio de la modelación de la transferencia de calor en sólidos ocupando elementos finitos.
- Calcular el flujo calórico que llega a la superficie

1.5. Hipótesis de trabajo

La distribución vertical de los elementos radiogénicos es un factor importante en el cálculo del flujo de calor en la corteza, debido a la producción de calor de los mismos. Secciones expuestas de la cortezas que puedan ser asociados a pseudo pozos profundos proveen una gran cobertura espacial extendiendo más el conocimiento, en relación con los pozos profundos. (Hasterok y Chapman, 2011). La tasa de producción de calor radiogénico A ($\mu W/m^3$), para cada unidad de roca en profundidad, puede ser calculado mediante la siguiente ecuación lineal :

$$A = \rho * 10^{-5} * (9,52C_U + 2,56C_{Th} + 3,48C_K) \quad (1.1)$$

donde ρ es la densidad (en kg/m^3), C_U , C_{Th} y C_K son las concentraciones de uranio (en ppm), torio (en ppm) y potasio (en ppm), respectivamente. (Rybach y Buntebarth, 1982) (ryb).

Una vez obtenida la producción de calor por parte de las rocas que componen el basamento en Talca, es posible estimar el flujo de calor resultante de estas, conociendo además la diferencia de temperatura entre los extremos de la litósfera y los mecanismos de trasferencia de calor en sólidos que predominan a distintas profundidades. Para la zona de estudio, la cual se considera como un área estable, poco deformada y sin magmatismo activo en la actualidad, se espera un flujo de calor entre $60 mW/m^2$ hasta los $70 mW/m^2$ (Springer, 1999) (Hamza et al., 2008)

1.6. Plan de trabajo

Trabajo en terreno: Se realizaron 3 campañas de terreno por un total de 21 días, en los cuales se midieron las concentraciones de U, Th y K de las rocas del basamento de Talca, alrededor de 500 mediciones en 80 puntos, se tomaron muestras de roca para los análisis siguiente:

A) **Petrografía:** Se realizaron 31 cortes transparentes para su descripción petrográfica. (muestras preparadas por el Laboratorio de Microscopía de Geología de la Universidad de Chile).

B) **Densidad:** Se determino la densidad de las muestras mediante el método arquimediano, con el fin de calcular la producción de calor de las rocas en estudio.

Se realizo un mapa geológico que combina las cartas 1:1.000.000 (Sernageomin) con otras de mayor detalle como la realizada por Bravo en 2001 de escala 1:100.000.

Se realizo un perfil estructural de la zona de estudio, con el fin de entender y modelar el flujo de calor a través de la corteza.

Capítulo 2

Marco Geológico

2.1. Rocas Metamórficas

2.1.1. Basamento Metamórfico (Bm)

El Basamento Metamórfico ubicado al oeste de la región de estudio, en el margen costero, se compone principalmente de pizarras, filitas, esquistos, metarenitas y rocas corneanas (Escobar et al., 1977 en Alfaro (2011)). González-Bonorino (1970) (en Alfaro (2011)) estudian y dividen la faja que aflora al norte del paralelo 36°30' en tres series de metamorfismo progresivo: Serie Curepto: Esta zona presenta un metamorfismo de tipo dinámico-térmico con un gradiente creciente hacia el oeste y condiciones de formación de presión alta. La asociación mineralógica principal indica facies de esquistos verdes. De este a oeste, se puede subdividir en zona de pizarra, de filitas y esquistos. Serie de Nirivilo: Presenta metamorfismo térmico en condiciones de baja presión, relacionado a la intrusión del granito Paleozoico. Serie Pichilemu: Muestra un metamorfismo dinámico-térmico, con gradiente creciente hacia el este y condiciones de presión baja a intermedia.

2.2. Rocas Estratificadas

2.2.1. Triásico Superior-Jurásico inferior (Tr)

Este conjunto de unidades se ubica al oeste de la zona de estudio y comprende las formaciones El Cisne, Crucero de los Sauce y Estero de la Higuera. Formación El Cisne (Corvalán et al, 1975. en Alfaro (2011)) Corresponde a una secuencia de lutitas fósiles, subgrauvacas de grano medio a fino y ortoconglomerados cuarcíferos. Esta formación descansa en contacto transgresivo sobre el granito paleozoico y está suprayacida pseudo-concordantemente por la Formación Laguna de Tilicura. La fauna fosilífera encontrada en los niveles medios de esta formación, permite asignarle una edad Triásico superior. Formación Crucero de los Sauces

y Formación Estero de la Higuera (Corvalán, 1976 en Alfaro (2011)) La Formación Crucero de los Sauces está conformada por ignimbritas y tobas brechosas en contacto depositacional con el granito paleozoico. En tanto la Formación Estero de la Higuera comprende niveles de areniscas cuarcíferas de grano medio y conglomerádica. Además, en esta formación se encuentran fósiles de fauna Monotis y Halobia que indican una edad enmarcada en el Triásico Superior.

2.2.2. Formación Altos de Hualmapu (Jmah)(Morel, 1981)(Bravo, 2001)

Morel (1981) definió la Formación Altos de Hualmapu como una sección de rocas volcánicas compuesta en su mayor parte por andesitas porfídicas y brechas volcánicas andesíticas de color gris verdoso. En la parte inferior de la unidad describe brechas sedimentarias compuestas por clastos volcánicos y también en sectores, clastos sedimentarios y fósiles marinos re TRABAJADOS (Weila sp.). La Fm. Alto de Hualmapu al sur del río Mataquito infrayace a rocas volcánicas y piroclásticas, con tonalidades rojizas de los Estratos de El Laurel. Hacia el norte en cambio, adquiere un importante desarrollo la Formación La Lajuela que se dispone sobre la Formación Alto de Hualmapu.

2.2.3. Formación La Lajuela (Klaj)(Bravo, 2001)

La sección de rocas volcánicas y rocas sedimentarias marinas clásticas y calcáreas, que aflora al oeste de la localidad de Santa Cruz, entre la cuesta La Lajuela y la localidad de Lolol, fue definida por Vergara (1969) como Estratos de La Lajuela, de edad Cretácica Inferior, incorporando los trabajos inéditos de terreno de Muñoz Cristi y Karzulovic (1958) y las determinaciones paleontológicas de Tavera (1958). El trabajo de Bravo (2001) propone subdividir la sección litológica estudiada por Vergara (1969) en dos unidades formacionales que comprenden el Jurásico Medio - Superior y el Cretácico Inferior, respectivamente, sobre la base de la diferenciación litológica de las rocas volcánicas y el desarrollo estratigráfico reconocido por el perfil regional.

Su base corresponde al contacto concordante entre la sección de rocas sedimentarias marinas compuestas de limolitas y areniscas finas calcáreas fosilíferas de edad Valanginiana que afloran en el Cerro La Sirena, asignadas a la nueva Formación La Lajuela, y las andesitas porfídicas gris oscuro, ocoíticas, infrayacentes asignadas al Jurásico medio - superior. Estas andesitas de la sección inferior de los Estratos de La Lajuela son consideradas equivalentes a las recién descritas en el área de estudio como Formación Alto de Hualmapu.(Bravo, 2001)

2.2.4. Formación Estratos de El Laurel (Bravo, 2001)

Se propone el nombre de Estratos de El Laurel para designar a una sección volcánica estratificada, compuesta por lavas, tobas y brechas de composición predominantemente an-

desítica. Las rocas de esta unidad tienen, en general, un característico color gris rojizo a gris morado.

El techo se ha definido como el contacto concordante con brechas sedimentarias aluviales y areniscas volcánicas mal seleccionadas correspondientes a la base de la unidad sobreyacente denominada Ignimbritas del Cerro Caupolicán.(Bravo, 2001)

2.2.5. Ignimbritas del Cerro Caupolicán (Bravo, 2001)

Se define esta unidad informal como un conjunto de tobas soldadas y bancos de sedimentitas epiclásticas bien estratificadas. Comprende una sucesión de areniscas volcánicas continentales y tobas de ceniza y cristales con coloración rojiza y pardo rojiza entre las cuales se intercalan dos conspicuos niveles o unidades de enfriamiento de tobas soldadas que se denominan nivel superior e inferior.(Bravo, 2001)

La base es el contacto aparentemente concordante entre brechas sedimentarias gruesas de color pardo rojizo y dacitas porfídicas gris claro parduscas de la unidad Ignimbritas del Cerro Caupolicán, reconocida en el sector de quebrada La Culebra, y tobas de cenizas y de lapilli de los Estratos de El Laurel.(Bravo, 2001)

Las Ignimbritas del Cerro Caupolicán se reconocen en una franja de afloramientos de 300 a 500 m de ancho a lo largo de toda la zona estudiada y en su prolongación hacia el norte en el sector de La Lajuela.

2.2.6. Estratos de Litú (Klit)(Bravo, 2001)

Los Estratos de Litú se definen como una secuencia bien estratificada de brechas volcánicas y tobas de ceniza con frecuentes intercalaciones de lavas porfídicas y escasas de areniscas, todo el conjunto con característico color gris morado a gris claro rosado. Se ha estimado un espesor de 480 m para la secuencia en el sector de Litú, encontrándose éste 9 km al sur, reducido a 200 m. Hacia el norte, en el sector de Eloísa, se reconoce una potencia de 260 m.(Bravo, 2001)

En el camino a orillas del Estero Tutucura aflora una sección basal que incluye el contacto con la toba soldada superior de las Ignimbritas del cerro Caupolicán.(Bravo, 2001)

2.2.7. Estratos de El Culenar (Kcul)(Bravo, 2001)

Comprende un conjunto de brechas volcánicas con andesitas porfídicas y afaníticas de color gris verdoso. Se estima un espesor de 2.200 m, medido en la ribera sur del río Mataquito al este de Villa Prat.(Bravo, 2001)

La base de esta unidad está marcada por el contacto concordante de un potente conjunto

de brechas volcánicas de color gris verdoso de esta unidad sobre tobas de lapilli bandeadas pertenecientes a los Estratos de Litú. (Bravo, 2001)

Los Estratos de El Culenar son las rocas estratificadas que cubren la mayor superficie del área estudiada, alcanzando su mayor desarrollo en el sector de El Culenar, 20 km al norte de Talca. Se reconocen ininterrumpidamente desde el río Mataquito hasta el río Claro al sur de Talca, conformando una franja elongada en sentido N 20° E.

2.2.8. Formación Abanico (OMa)(Aguirre, 1960)(González y Vergara, 1962)

González y Vergara (1962) designan como Formación Abanico al conjunto de volcanitas, tobas, brechas, tufitas y lavas porfídicas. En menor medida se encuentran intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales como areniscas, grauvacas y limolitas. Las rocas que componen esta unidad se distribuyen principalmente en la vertiente occidental de la Cordillera Principal y afloran a lo largo de toda el área de estudio.

Debido a la ausencia fosilífera, la edad asignada a esta formación se obtiene en base a su posición estratigráfica y actitud tectónica. Puesto que la Formación Abanico se encuentra superpuesta a formaciones neocomianas superiores como Colimapu y Plan de los Yeuques, se ha fijado un límite inferior post-Neocomiano.

2.3. Rocas Intrusivas

2.3.1. Basamento Granítico (Bg)

El Basamento Granítico consiste fundamentalmente en tonalitas y granodioritas de grano medio a grueso, los que muestran haber estado sometidos a fuertes efectos cataclásticos. En general los granitoides que conforman esta unidad, se distribuyen en el sector occidental del área, en la Cordillera de la Costa, en una franja a grandes rasgos paralela al Basamento Metamórfico, al oriente de éste. El contacto entre ambas unidades es aproximadamente norte-sur (Escobar et al., 1977 en (Alfaro, 2011)). Levi et al. (1963) (en (Alfaro, 2011)), determinaron una edad máxima de 340 ± 40 Ma. y una mínima de 291 ± 40 Ma. Las rocas triásicas que afloran hacia el este se apoyarían discordantemente sobre este basamento. Así, se le puede asignar una edad Paleozoico superior.

2.3.2. Batolito Andino

Conjunto de rocas plutónicas de edad Cretácica a Terciaria inferior. De composición variable entre tonalitas y granodioritas. Su distribución se observa en franjas aproximadamente norte-sur tanto en la Cordillera Principal, como en la vertiente occidental de la Cordillera de

la Costa. Se reconoce además una evolución temporal hacia el este donde afloran rocas cada vez más jóvenes. En esta zona, las rocas intrusivas más jóvenes se ubican hacia el noreste y comprendería granodioritas de hornblenda y biotita, en menor proporción monzogranitos, monzonitas cuarcíferas y monzodioritas (Msg). (Alfaro, 2011)

En la Cordillera de la Costa, Bravo (2001) reconoce una franja intrusiva Jurásica (Jig) en la parte central de la Cordillera de la Costa, al este del Batolito costero, compuesta por rocas holocristalinas de composición diorítica gradando localmente a granodiorita y microtonalitas.

Al este de dicha unidad, se distribuye una franja de intrusivos cretácicos (Kiag) de textura holocristalina, hipidiomórfica granular, en cuerpos mayores, gradando a porfídica en los cuerpos menores que además intruyen a los Estratos de El Culenar y la Formación Lo Valle. La composición de estas rocas es esencialmente granodiorítica con tonalitas y monzonitas.

2.4. Depósitos Cuaternarios

2.4.1. Depósitos Fluviales y Aluviales (Q)(Hauser, 1995)

Se incluyen aquí sedimentos clásticos de grano normalmente gruesos (ripios y gravas, con frecuentes niveles arenosos) marginales al actual cause de los ríos mayores: Mataquito, Claro, Lontué, Maule, Loncomilla; Los depósitos expuestos en el borde de potentes terrazas en el río Maule, en la porción media del Valle Central (sector Puente Pando-Chequén), poseen persistente estratificación cruzada y ausencia de niveles finos. Los clastos de estos sedimentos, predominantemente volcánicos y graníticos, son subredondeados, con superficies lisas, muy bien pulimentados, de aspecto fresco y muy resistentes.

2.4.2. Depósitos Piroclásticos (Pl3)(Hauser, 1995)

A nivel regional, esta unidad está integrada por una gruesa secuencia en la que predomina una alternancia de capas de cenizas y tobas de lapilli de carácter ácido; en su composición, participan esquiras vítreas, cristales de plagioclasa y fragmentos de pómez. En el sector de Esmeralda, 6 km al oriente de Talca, la sección superior de la secuencia, de 12-15 m de espesor, incorpora una capa bien desarrollada de arena media a gruesa, constituida por cuarzo y abundante ceniza; se presenta bastante friable, muy porosa y permeable.

2.5. Estructuras

Las estructuras geológicas presentes en la zona de estudio muestran una distribución acotada, con orientaciones preferenciales NS a NE en la Cordillera Principal y NNE a NW en la Cordillera de la Costa. Además, destaca la presencia de lineamientos que delimitan los márgenes oriental y occidental de la Depresión Intermedia. La mayor parte de las estructuras aquí

expuestas, han sido identificadas principalmente en base a mapeos y trabajos anteriores (e.g. (Aguirre, 1960); (Escobar et al., 1977);(Sernageomin, 2003); (González, 2008);(Benavente, 2010);(Tapia, 2010); (Alfaro, 2011)). Las principales estructuras son:

2.5.1. Falla Pocuro - San Ramón

El sistema estructural asociado a la Falla Pocuro – San Ramón, estaría controlando el límite entre la Depresión Central y la Cordillera Principal en la zona centro – sur de Chile, con rasgos mayormente destacados a la latitud de Santiago. Esta estructura inversa de vergencia oeste correspondería a un retrocorrimiento, el cual formaría parte de un sistema mayor donde la deformación regional se desplazaría hacia el este (Fariás, 2007 en (Alfaro, 2011)) o un sistema de rampa thrust en el frente de un despegue basal con tasas de deslizamiento cercanas a los 0,4 [mm/año] (Armijo et al., 2010 en (Alfaro, 2011)).

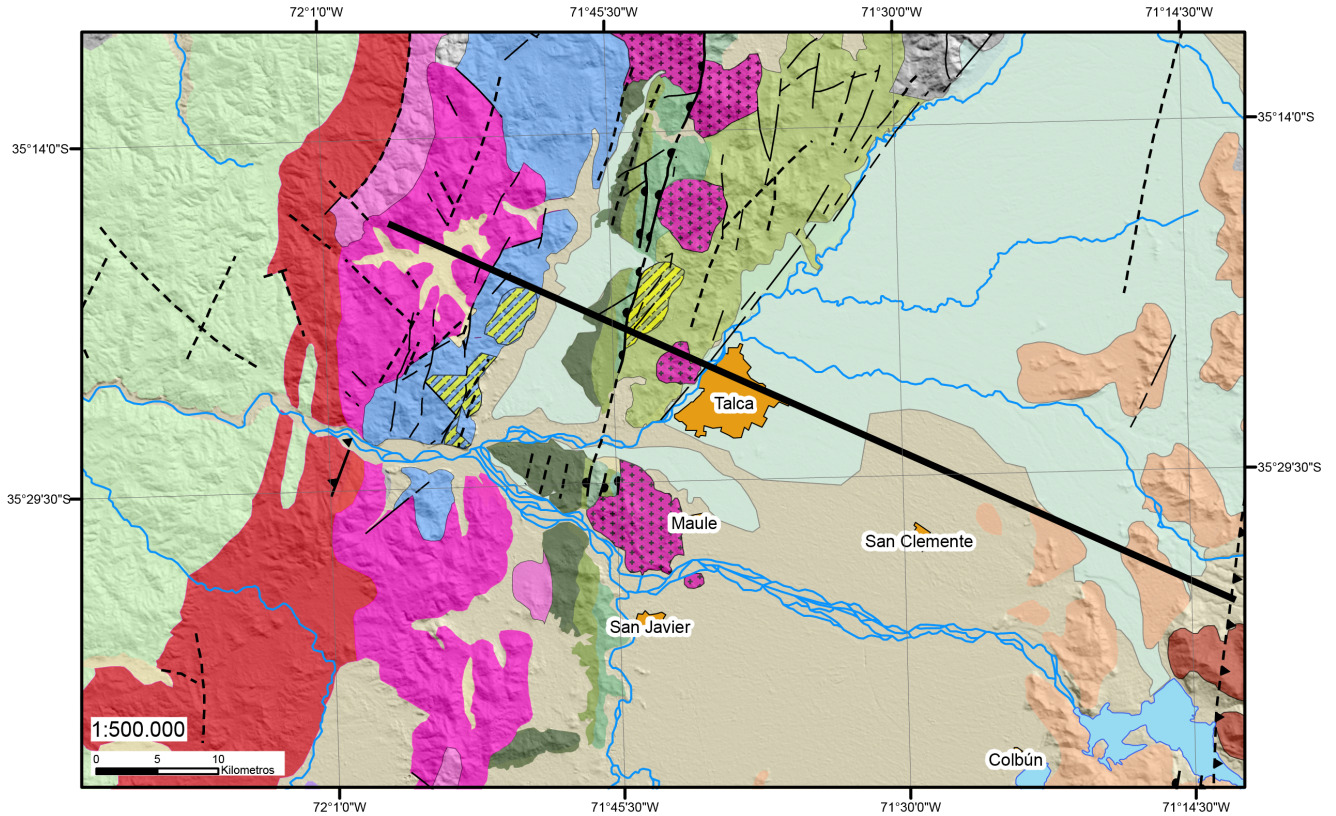
2.5.2. Falla Los Ángeles - Infiernillo

Esta falla sería la estructura que delimita el borde occidental de la Depresión Central con la Cordillera de la Costa en la zona central de Chile. Corresponde a una falla normal, parcialmente invertida a falla inversa con vergencia hacia el oeste (Fock, 2005; Fock et al., 2006 en (Alfaro, 2011)). En el área que comprende este trabajo, la traza estaría cubierta por los depósitos volcano-sedimentarios del valle central, sin expresiones claras en superficie salvo algunos lineamientos menores y “cerros isla” alineados.

2.5.3. Falla Litú

Es el sistema de fallas más relevante en el sector oriental de la Cordillera de la Costa. Ha sido estudiada por Bravo (2001) quien establece que corresponde a una falla normal dispuesta con rumbo N10-N15°E. Su manteo hacia el oeste pondría en contacto rocas de los Estratos de Litu con rocas intrusivas faneríticas del Cretácico. En algunos sectores del contacto por falla se puede observar alteración hidrotermal, lo que permitiría interpretar una fallamiento ocurrido simultáneo al emplazamiento de los cuerpos intrusivos o durante el enfriamiento de los mismos. (Alfaro, 2011)

Mapa Geológico



Leyenda

- Perfil 1
- Ríos y Esteros
- Zonas Urbanas
- Alteración Hidrotermal

Estructuras

- Anticlinal
- Falla inferida
- Falla inversa
- Falla inversa inferida
- Lineamiento
- Falla normal
- Sinclinal

Rocas Estratificadas

- OMa: Formación Abanico
- Kcul: Formación El Culenar
- Klit: Estratos de Litu
- Kcc: Ignimbritas de Cerro Caupolicán
- Klau: Estratos de El Laurel
- Jmah: Formación Altos de Hualmapu
- Tr: Triásico-Jurásico

Rocas Metamórficas

- Bm: Basamento Metamórfico

Rocas Intrusivas

- Mg: Granodioritas
- Kiag: Intrusivo Granodiorítico
- Jig: Intrusivo Diorítico
- Bg: Basamento Granítico

Depósitos no Consolidados

- Pl3: Depósitos proclásticos
- Q: Depósitos Fluviales y aluviales

Figura 2.1: Mapa geológico de la cuenca de Talca.

Capítulo 3

Metodología

La forma de estimar el flujo de calor en la cuenca de Talca, en este trabajo, es mediante la modelación numérica de elementos finitos. Se modelará la corteza y el manto litosférico en el área de estudio, con el fin de identificar las fuentes de calor que producen el flujo de calor bajo la cuenca de Talca; para ello se necesitan una serie de parámetros tanto geológicos, físicos y del propio software a utilizar en la modelación. Por la parte geológica es necesario poseer el modelo estructural el cual servirá como base donde aplicar la modelación, hay que determinar características de las rocas, tales como: densidad, la producción de calor (fuente de calor), propiedades termales (capacidad calorífica y conductividad térmica). Por su parte, el software requiere las condiciones de borde (aislamiento, temperaturas iniciales-finales), determinar los límites del sistema para evitar sesgos geométricos y establecer una malla en para el modelo. Finalmente revisar las ecuaciones y métodos a utilizar en la modelación.

3.1. Perfil Estructural

Para poder establecer la geometría en donde aplicar el modelo, es necesario construir un perfil estructural de la zona, para lo cual se utilizarán los datos geológicos y estructurales de la superficie, además de datos geofísicos tales como gravimetría y velocidad ondas sísmicas. Sobre la base del perfil se identificarán las principales divisiones de la corteza, el límite corteza-manto y el límite litósfera-asténósfera.

3.2. Producción de calor radiogénico

La producción de calor radiogénico RHP (por sus siglas del inglés Radiogenic Heat Production), se debe a la desintegración radiactiva de los elementos radiógenos, mediante ella la masa se convierte en energía y una gran parte de esta es convertida en calor. Todos los isótopos radioactivos generan calor, pero sólo la contribución de la desintegración de las series U^{238} , U^{235} , Th^{232} y K^{40} son geológicamente importantes. (Vilà et al., 2010)

3.2.1. Producción de calor radiogénico en rocas

Para poder estimar el RHP de las rocas, se hace uso de sus propiedades petrofísicas (densidad y concentración de elementos radiogénicos) y aprovechando que la magnitud de estas es escalar e isotrópica, además de ser casi totalmente independiente de las condiciones in situ de temperatura y presión. La dimensión de la producción de calor A es de W/m^3 ; en geotermia, se usa usualmente la unidad en $\mu W/m^3$. Basado en lo anterior y mediante el estudio de las energías aportadas por cada serie de desintegración, se le asigna un factor a cada concentración de elemento radiogénico, diversos autores han establecido distintas constantes, las diferencias entre ellas son menores al 3% (Clauser, 2011). Actualmente las constantes mas utilizadas son los aportados por Rybach (1988), quien establece la fórmula 1.1:

3.2.2. Medición con espectrómetro de rayos gamma

Para hacer las mediciones de concentración de los RHPe, se utilizará un espectrómetro/escintilómetro de rayos gamma portátil (RS-125, de Radiations Solutions Inc. ver figura 3.1), el cual mide las energías del espectro de radiación y las identifica con cada elemento en particular. El instrumento cuenta con un cristal de NaI(Tl) de unos 100 cm^3 como detector, el que puede ser ajustado para responder a energías desde los 0,03 MeV hasta los 3 MeV, que son registradas en 1.024 canales. Para identificar los RHPe se utilizan ventanas de energía entorno a 1,461 MeV para el K, 1,765 MeV para el U y 2,615 MeV para el Th, como se aprecia en la figura 3.2. El tiempo de medición es de 5 minutos, por recomendación del fabricante para zonas con bajas concentraciones de RHPe y poder obtener una mayor calidad de datos. La International Atomic Energy Agency (IAEA) establece una precisión para este tipo de instrumentos en torno a 0,1% K, 0,4 ppm eU (uranio equivalente) y 0,6 ppm eTh (torio equivalente).

Las fuentes de error para el instrumento vienen dada por:

- **Estadística:** Se debe estrictamente al error estadístico producido en la medición, así que si se realiza el conteo con el suficiente tiempo, es posible alcanzar mayor grado de precisión y exactitud.
- **Calibración:** Hay cierto nivel de error cuando el instrumento se calibra, por lo que la matriz de calibración medida esta desplazada con respecto a la matriz correcta. Esto dará lugar a un pequeño componente de error sistemático que afecta a la precisión. En niveles más altos, o si el tiempo de recuento se extiende (4 minutos a 4% K, 25 ppm U, Th 70 ppm) este error será comparable al error estadístico y seguirá aumentando más rápido que el error estadístico.
- **Geometría:** Hay que considerar la geometría de la roca, el instrumento considera una roca de cara plana de por lo menos un metro de diámetro por un metro de profundidad, de condiciones homogéneas.
- **Tiempo de conteo:** A mayor tiempo de conteo, se obtiene una mejor precisión y certeza en los datos, se considera que 5 minutos son el estándar para condiciones de bajas anomalías en RHPe.
- **Interferencia cruzada:** Producto de la interferencia que que se producen en los espectros de rayos gamma, el error combinado puede ser calculado usando la tabla 3.1 y la ecuación siguiente:

$$Error_{U,Th,K} = \sqrt{(\sigma_U)^2 + (\sigma_{Th})^2 + (\sigma_K)^2} \quad (3.1)$$

A modo de ejemplo, para una medición de 1%K, 10ppm U y 10ppm Th, el error combinado para K es : $Error_K = \sqrt{0,096^2 + 0,135^2 + 0,072^2} = 0,18$.



Figura 3.1: Espectrómetro/escintilómetro de rayos gamma portátil RS-125, de Radiations Solutions. Realiza conteo de rayos gamma mediante un detector de Sodio-Yodo que responde a energías de entre 30KeV-3.000KeV en 1.024 canales.

Tabla 3.1: Tabla para el cálculo de error estadístico, considera solo valores de ± 1 sigma por ser una muy buena estimación. Cálculo del error mediante la fórmula $Error_{U,Th,K} = \sqrt{(\sigma_U)^2 + (\sigma_{Th})^2 + (\sigma_K)^2}$.

K %	1 sigma K %	1 sigma U ppm	1 sigma Th ppm
0	0,000	0,000	0,000
0,1	0,030	0,041	0,006
1	0,096	0,130	0,019
5	0,214	0,291	0,042
10	0,303	0,412	0,060
U ppm	1 sigma K %	1 sigma U ppm	1 sigma Th ppm
0	0,000	0,000	0,000
1	0,043	0,307	0,027
10	0,135	0,970	0,087
100	0,427	3,067	0,274
1.000	1,349	9,698	0,866
10.000	4,270	30,670	2,740
Th ppm	1 sigma K %	1 sigma U ppm	1 sigma Th ppm
0	0,000	0,000	0,000
1	0,023	0,237	0,539
10	0,072	0,750	1,705
100	0,228	2,373	5,391
1.000	0,721	7,504	17,047
10.000	2,280	23,700	53,900

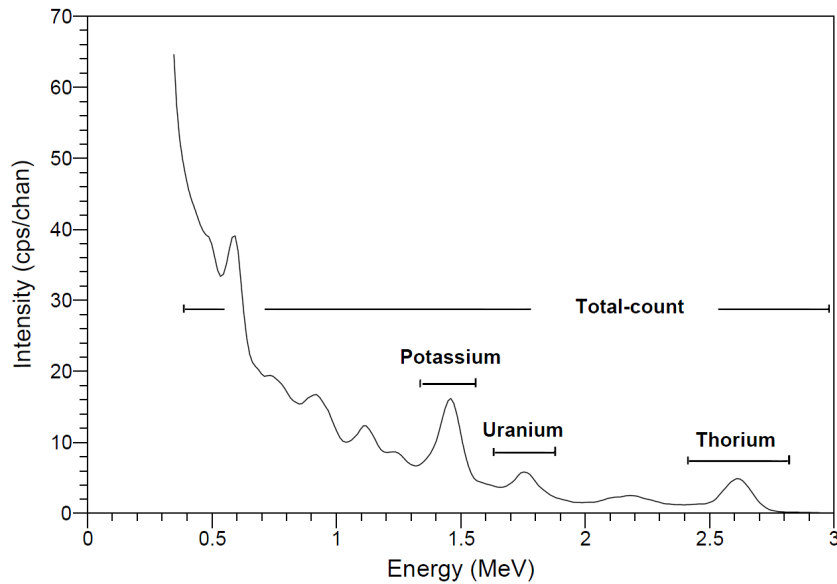


Figura 3.2: Espectro típico de rayos gamma, mostrando las ventanas de energía convencionales. Peaks de 1,461 Mev para el Potasio, 1,765 MeV para el U y 2,615 MeV para el Torio

3.2.3. Tratamiento de los datos

Los datos obtenidos, deben ser evaluados en cuanto a su validez. Primero hay que rechazar aquellos datos que sean producto de una mala manipulación del instrumento, tal como, medir sin que el instrumento esté estabilizado, terminar la medición antes del tiempo establecido (5 minutos en este caso), medir en una roca inferior al tamaño mínimo ($1m^3$), no medir en una superficie plana. También hay que considerar los factores geológicos, como buscar un afloramiento lo mas fresco posible, evitar la roca muy meteorizada o muy fracturada.

En cada punto elegido para obtener datos, se realizaron entre 3 y 10 mediciones, esto responde al grado de dispersión de las mediciones, si la dispersión es mínima, se toman 3 datos, si es muy amplia, se toman varios datos, para identificar si existen distintos sets de datos o una tendencia clara. Posteriormente estos puntos serán agrupados por formación geológica.

3.3. Propiedades termales de las rocas

3.3.1. Capacidad Calorífica (C_p)

La capacidad calorífica (J/kgK) se define como la cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una unidad de masa ($1kg$) de una sustancia por una unidad de incremento en temperatura ($1K$). La capacidad calorífica C_p a presión constante y la capacidad calorífica C_v a volumen constante para un solido a temperatura ambiente son iguales con un margen $\leq 1\%$ (Cezairliyan, 1981 en (Schärli y Rybach, 2001)). La capacidad calorífica es isotropía, en contraste con con la conductividad termal que es altamente anisótropa. La capacidad calorífica es altamente significativa para el modelamiento termal en el tiempo, porque cuando las rocas y sedimentos se calientan rápidamente, el calor requerido para elevar la temperatura de las rocas puede representar una fracción sustancial del flujo de calor total. Cuando la sedimentación o la erosión son lentas, el efecto de la capacidad calorífica es pequeño, porque el monto de calor tomado entregado por las rocas y sedimentos representa una pequeña fracción del total del flujo de calor, y así no afecta fuertemente el gradiente geotermal. (Waples y Waples, 2004).

Para medir la capacidad calorífica bajo unas determinadas condiciones es necesario comparar el calor absorbido por una sustancia (o un sistema) con el incremento de temperatura resultante. En este estudio se utilizaran valores extraídos de la literatura. Dada la alta variabilidad del C_p en rocas de la corteza, se utilizarán valores promedio para las distintas capas de la litósfera.

3.3.2. Conductividad Termal (k)

La conductividad térmica ($W/(K * m)$) de una roca es la capacidad de conducir el calor a través de ella, o sea es la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras moléculas. La conductividad es isotrópica para la mayoría de las rocas volcánicas y plutónicas, lo cual no ocurre con las rocas sedimentarias y metamórficas, que presentan una alta anisotropía. En general la conductividad termal de las rocas decrece, al aumentar la temperatura, hay que tomar en cuenta los efectos de la porosidad, para ello se miden las rocas en estado saturado y seco, generalmente se considera que las mediciones de rocas húmedas son mas reales en relación a las muestras tomadas en terreno (Vosteen y Schellschmidt, 2003). Los valores a utilizar corresponderán a los obtenidos desde la literatura y dada la variabilidad, se utilizaran valores promedios para cada capa de la litósfera.

3.4. Densidad de las rocas

La densidad se define como la masa por unidad de volumen (kg/m^3). En las rocas, está estrechamente relacionada con la composición mineral. La densidad de la roca debe estar claramente definida: la densidad total, controlada por la porosidad y grado de cementación y la densidad de la matriz, dada por los componentes de esta y no toma en cuenta la porosidad (Sousa Camposinhos, 2014). La composición mineral de las rocas es controlada por los procesos genéticos y alterada por procesos secundarios. En rocas ígneas, los procesos secundarios regionales, usualmente presentan un efecto menor en la densidad. Para estas rocas la densidad se convierte en una buena herramienta de clasificación. Para rocas plutónicas ácidas, la densidad es controlada por la cantidad de minerales máficos, mientras que para las rocas básicas la cantidad de plagioclasa es determinante (Henkel, 1970; Platou 1968 en (Henkel, 1976)).

La densidad se midió usando los principios arquimedeanos, se pesa la roca en seco, luego se masa la roca en el aire y luego se masa sumergida en el agua (mediante una pesa de gancho), con la roca totalmente sumergida y sin tocar el fondo, la diferencia entre el peso en seco y dentro de el agua, corresponde al peso del volumen de agua desplazada, tomando la densidad del agua tal como $1\text{ gr}/\text{cm}^3$, se obtiene el volumen de la roca.

3.5. Modelo de transferencia de calor en sólidos con elementos finitos

Se utilizara el software Comsol Multiphysics 4.3, que es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos. También permite introducir sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales (EDP). El método permite obtener una solución numérica aproximada sobre un sistema, en el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado

de subdominios no-intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo. Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

Capítulo 4

Antecedentes

4.1. Litología y propiedades físicas de las rocas

4.1.1. Corteza superior

Para este estudio es necesario conocer las unidades que componen la corteza superior, de ellas es necesario conocer las unidades geológicas, su espesor y su probable extensión bajo la cuenca de Talca. Las mediciones se realizaron en las unidades aflorantes que limitan la cuenca.

Triásico superior-Jurásico inferior

Secuencia sedimentarias marinas y continentales formadas por lutitas fósiles, subgrauvacas de grano medio a fino, ortoconglomerados cuarcíferos ignimbritas, tobas brechosas, areniscas cuarcíferas de grano medio a conglomerádica. De una potencia aproximada de 1.000 m.

Formación Altos de Hualmapu

Rocas volcánicas compuesta en su mayor parte por andesitas porfídicas y brechas volcánicas andesíticas. De una potencia aproximada de 3.500 m.

Estratos El Laurel

Sección volcánica estratificada, compuesta por lavas, tobas y brechas de composición predominantemente andesítica. De una potencia aproximada de 1.000 m.

Ignimbritas de Cerro Caupolican

Secuencia bien estratificada de brechas volcánicas y tobas de ceniza con frecuentes intercalaciones de lavas porfídicas y escasas de arenisca. De una potencia aproximada de 240 m.

Estratos de El Culenar

Conjunto de brechas volcánicas con andesitas porfídicas y afaníticas. De una potencia aproximada de 2.000 m.

Formación Abanico

Conjunto de volcanitas, tobas, brechas, tufitas y lavas porfídicas. En menor medida se encuentran intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales como areniscas, grauvacas y limolitas. De una potencia aproximada de 2.400 m. (Thiele 1980)

Intrusivo Jurásico

Compuesta por rocas holocristalinas de composición diorítica gradando localmente a granodiorita y microtonalitas. Además, se incluye un conjunto de stocks de pórfido diorítico y pórfidos monzoníticos. Para calcular su potencia se utilizó la ecuación $T = 0,12 * L^{0,88}$ (Vigneresse y Clemens, 2000) en donde T es a profundidad del intrusivo, L el largo de su eje mayor, dando una profundidad aproximada de 5.000 max.

Intrusivo Cretácico

Esencialmente compuesto por granodiorítica con tonalitas y monzonitas. Para calcular su potencia se utilizó la ecuación $T = 0,12 * L^{0,88}$ (Vigneresse y Clemens, 2000) en donde T es a profundidad del intrusivo, L el largo de su eje mayor, dando una profundidad aproximada de 4.400 max.

4.1.2. Corteza media

La corteza media es definida por Rudnick (2003), como : i) la parte media, donde las velocidades estructurales sugieren una división natural de la corteza en tres capas; ii) la región entre la corteza superior y la discontinuidad de Conrad, iii) la primera capa si es que hay dos capas bajo la discontinuidad de Conrad. Generalmente la corteza media se ubica entre los 12 km y 23 km de profundidad, para una corteza promedio de 40 km de espesor. El estudio de las secciones corticales expuestas, y en xenolitos, indican que la corteza media esta

dominada por rocas metamórficas en facies anfíbolita hasta a llegar a granulita. (Rudnick y Gao, 2003). En el área de estudio se asumirá una corteza media de entre ~ 12 km y los 20 km.

4.1.3. Corteza inferior

La corteza inferior va desde la corteza media (20 km) de profundidad hasta el Moho, estos límites se establecen por un lado por los datos de Tassara (2012) que establecen el Moho a 35 km, litológicamente la corteza inferior es mas acorde a una facie de granulita. Los parámetros a utilizar son los presentados en la tabla 4.1 y 4.2.

La composición de la corteza inferior de una zona de antearco está dada por granulitas félsicas y granulitas máficas (Hans Wedepohl, 1995)(Rudnick y Fountain, 1995). La RHP de la corteza media corresponde a $0,37 \mu W/m^3$ (He et al., 2009).

4.1.4. Manto litosférico

El manto litosférico va desde el Moho, aproximadamente a 35 km de profundidad hasta el límite con la astenósfera a unos 57 km de profundidad . De una composición de olivinos, piroxenos y feldespatos cálcicos. Los parámetros a utilizar son los presentados en la tabla 4.1 y 4.2.

De acuerdo a una compilación de la composición química de xenolitos del manto, se estimó que el promedio de producción de calor radiogénico del manto litosférico es de $0,031 \pm 0,024 \mu W/m^3$ y una mediana de $0,022 \mu W/m^3$ (Hasterok y Chapman, 2011). Para una peridotita según He (2009) el valor es de $0,02 \pm 0,004 \mu W/m^3$ (He et al., 2009)(Hasterok y Chapman, 2011) .

Propiedades termales de las rocas

Las propiedades termales utilizadas en la modelación fueron obtenidas de la literatura, considerando los datos mas afines a las rocas presentes en la zona de Talca.

4.1.5. Conductividad termal (k)

Cuadro resumen con la conductividad termal para cada capa la litósfera.

Tabla 4.1: Valores referenciales de k (He et al., 2009)

Capa	$k[Wm^{-1}K^{-1}]$
Corteza Superior	2.9
Corteza Media	2.8
Corteza Inferior	2.5
Manto Superior	3.0

4.1.6. Capacidad calórica a presión constante (C_p)

Cuadro resumen con la capacidad calórica a presión constante para cada capa la litósfera.

Tabla 4.2: Tabla resumen C_p capacidad calorífica.

Capa	$C_p[J/(kg * K)]$
Corteza Superior	800 (*)
Corteza Media	1000(*)
Corteza Inferior	$1617,4 - 0,0210 * T - 14047 * T^{-0,5}$ (**)
Manto Superior	$1828,8 - 0,0103 * T - 18285 * T^{-0,5}$ (****)

(*)(Robie, 1995), (**)(Vosteen y Schellschmidt, 2003), (***)(He et al., 2009),
(****)(Merriman et al., 2013)

4.1.7. Producción de calor radiogénico en la litósfera

Cuadro resumen con la producción promedio de calor radiogénico para cada capa la litósfera.

Tabla 4.3: Valores referenciales de RHP y k (modificado de He et al. (2009))

Capa	$RHP[\mu W m^{-3}]$
Corteza Superior	1.1
Corteza Media	0.83
Corteza Inferior	0.37
Manto Litosférico	0.02

4.1.8. Densidad de las rocas

Las densidades de las rocas fueron medidas a partir de muestras obtenidas en terreno, a excepción de los valores para la corteza media, inferior y manto litosférico, que fueron obtenidas de la literatura.

Tabla 4.4: Tabla resumen ρ es la densidad promedio de la formación.

Unidad Geologica	$\rho[kg/m^3]$
Fm. Abanico	2.540
Fm. El Culenar	2.520
Estratos del Litu	1.570
Fm. Cerro Caupolicán	1.540
Estratos de El Laurel	2.550
Fm. Hualmapu	2.590
Triásico	2.530
Intrusivo Cretácico	2.500
Intrusivo Jurásico	2.640
Corteza Media	* 2.700
Corteza Inferior	* 3.100
Manto Litosférico	* 3.100

(*)(Tassara, 2006)

4.2. Perfil estructural

Para la zona de estudio se realizó un modelo estructural tomando en cuenta los trabajos realizados por Bravo (2001) en la zona de estudio ($35,45^{\circ}\text{S}$), Krawczyk (2006) al sur, en la zona de Cobquecura ($36,2^{\circ}\text{S}$) y con el apoyo de trabajos realizados al norte ($33,45^{\circ}\text{S}$) por López (2008) y Armijo et al. (2010). Además se contó con el trabajo de Tassara (2012) quien estudio la anatomía andina en la zona de subducción, la cual entrega información de la estructuras profundas del área de estudio.

Las formaciones presentan en general un rumbo de $\text{N}35^{\circ}\text{E}$ con un manteo promedio de 30° hacia el sureste. Las secuencias desde el triásico hasta el cretácico son de carácter concordante y existiría una discordancia por erosión con las secuencias del oligoceno-mioceno. Existen una serie de fallas normales en el área de estudio, posiblemente generadas en el régimen de extensión desarrollado en el cretácico. La expansión de la cuenca habría ocurrido a través de una falla lítrica principal y un sistema de bloques rotados en dominó, similar al modelo que se observa en la ilustración 4.1. De este modo el proceso descrito, junto a la continua depositación de la secuencia (Bravo, 2001).

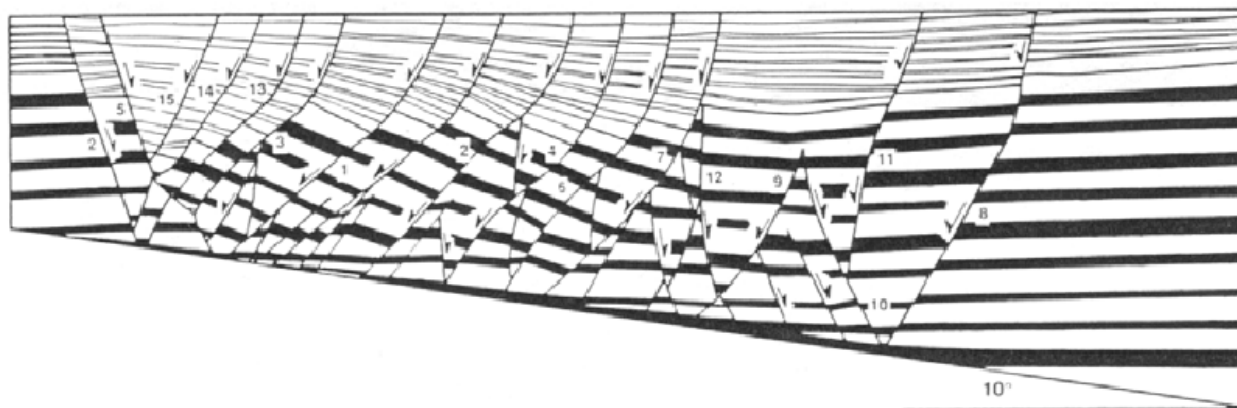


Figura 4.1: Modelo de extensión a través de una falla de piso levemente inclinada. Desarrolla un graben asimétrico con un arreglo interno de una falla lítrica principal y un sistema de bloques rotados. (McKlay y Ellis, 1987, en (Bravo, 2001)).

Para las formaciones descritas por Bravo (2001) y su extensión en profundidad se tomó en cuenta los trabajos de López (2008) y Armijo (2010), el primero es un estudio de la corteza a lo largo de los $33^{\circ} 45'\text{S}$, desarrollando un modelo estructural a partir de un perfil gravimétrico, usando información geológica y geofísica para restringirlo. En este trabajo es posible reconocer una cuenca de alrededor de 18 km de ancho, en la que se encuentran rocas asignadas al Mesozoico y al Cenozoico. Las rocas Mesozoicas de la Cordillera de la Costa yacen o son intruidas por granodioritas Paleozoico y Jurásico – Cretácico que constituyen el Batolito Costero o sobre cuerpos gabroicos en profundidad. Las rocas Mesozoicas de la Cordillera Principal muestran un nivel de despegue cercano a los 15 Km de profundidad, mostrando una estructura de rampa-flat con vergencia hacia el este, que acomoda la deformación de las secuencias mesozoicas en una faja plegada y corrida de piel delgada. Espesores de alrededor de 10 Km para las secuencias cenozoicas en la Cordillera Principal, que muestran un estilo

de deformación diferente a la mostrada por los depósitos mesozoicos. Estos espesores pueden verse duplicados por cuerpos intrusivos de composición granítica. La ubicación de estos intrusivos está controlada por las mismas estructuras que controlan la deformación de la cubierta cenozoica. Todo esto representado en la ilustración 4.2(López, 2008).

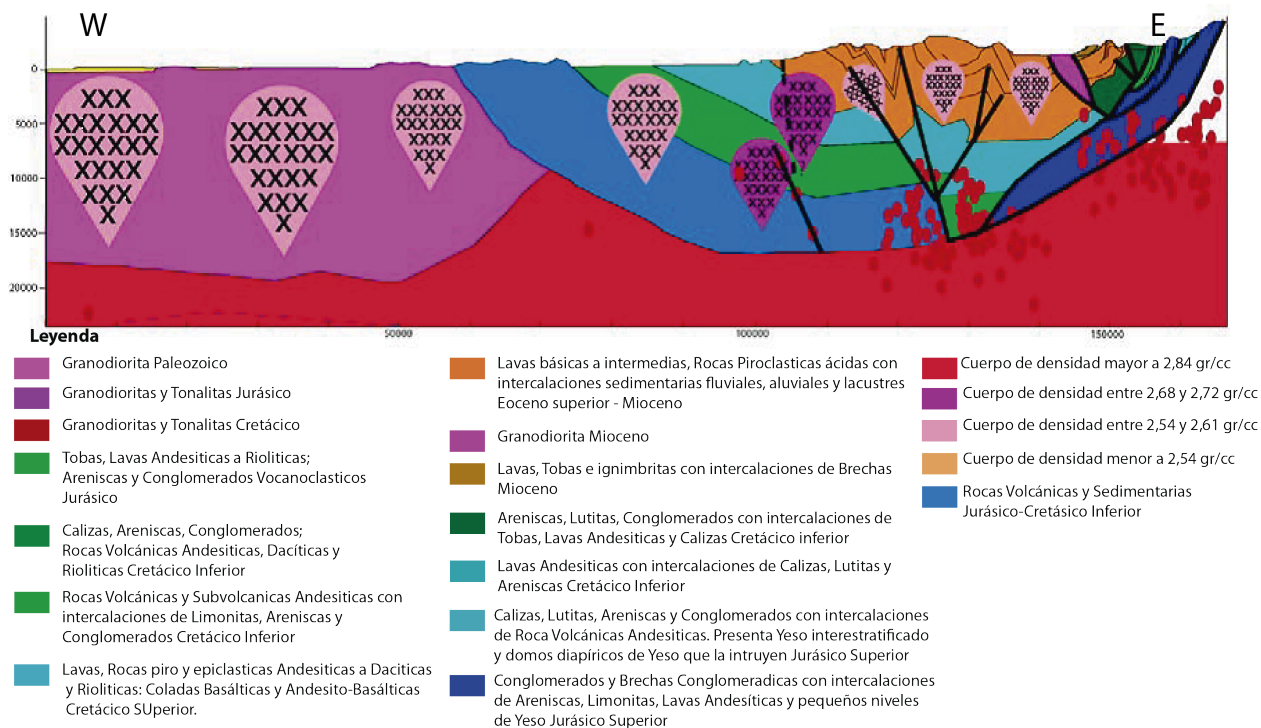


Figura 4.2: Desarrollo de un modelo estructural a partir de un perfil gravimétrico en la cuenca de Santiago.(López, 2008)

Por otro lado el trabajo de Armijo (2010) presenta mayor información para la zona central y oriental de la cuenca, con su trabajo en la zona de los 33° 30' latitud sur. Ver ilustración 4.3.

Para poder establecer la segregación de la corteza en corteza superior, media e inferior, se utilizaron como referencia estudios de ondas sísmicas que muestran claramente la división interna de la corteza. El primer trabajo en se ubica entre los 34,5°S y los 38°S, realizado por Moscoso (2011), que se resume en la figura 4.4 (Moscoso et al., 2011) y el trabajo realizado por Krawczyk (2006) entre los 36°S y los 39°S (Krawczyk et al., 2006). También se tomo en cuenta estudios mundiales para zonas de arco continental.(Christensen y Mooney, 1995).

El perfil mantiene la relación de espesor de la columna estratigráfica (figura 4.6) presentada por Bravo (2001) y modificada en este estudio para la zona en particular por donde pasa el perfil estructural, que incorpora los datos de manteo disponibles.

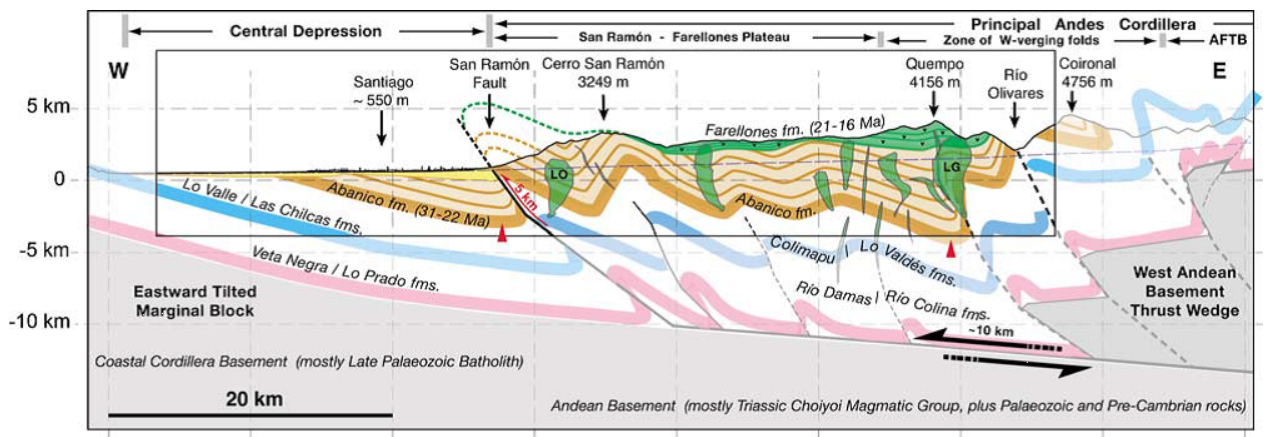


Figura 4.3: Interpretación estructural del sector oeste de la Cordillera Principal a la latitud de Santiago, asociada al manto al este de la falla de San Ramón de geometría rampa-flat (Armijo et al., 2010)

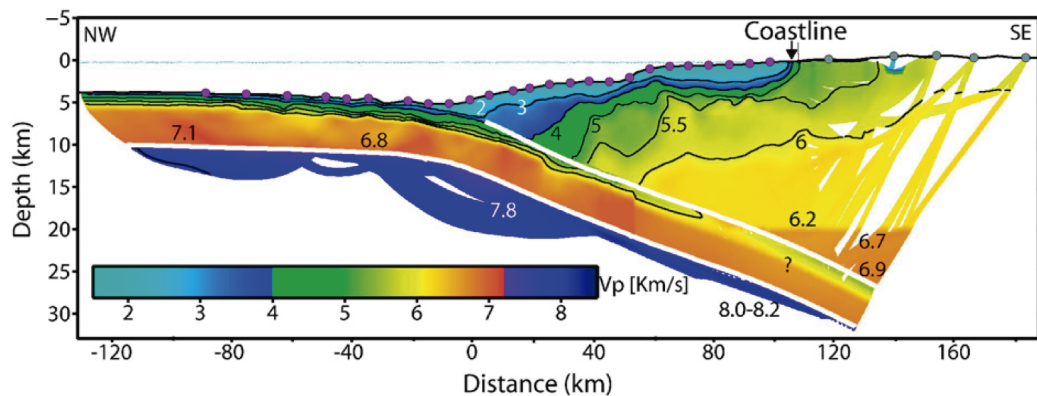


Figura 4.4: Imagen sísmica del Maule entre los 34.5°S y 38°S, perfil obtenido por la inversión conjunta de refracción / reflexión y enmascarado por las trayectorias de las ondas sísmicas. El tiempo residual global del modelo es 0,103 ms ($\chi^2 = 1,1$) (Moscoso et al., 2011)

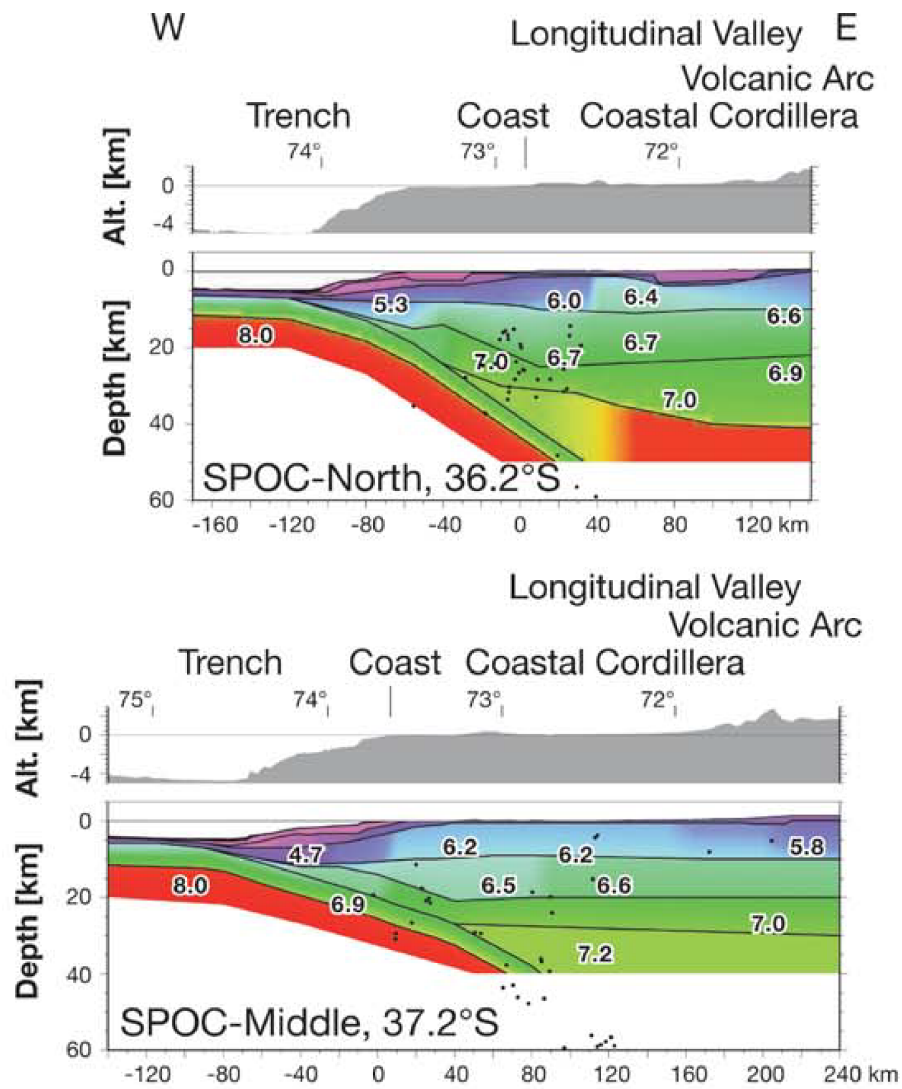


Figura 4.5: Perfil de refracción de ondas sísmicas desde los 36°S hasta los 37°S de los proyectos ISSA y SPOC (modificado de Lüth et al. 2003a, 2003b; Krawczyk y el equipo SPOC 2003). En color las velocidades de ondas P en km/s . (Krawczyk et al., 2006)

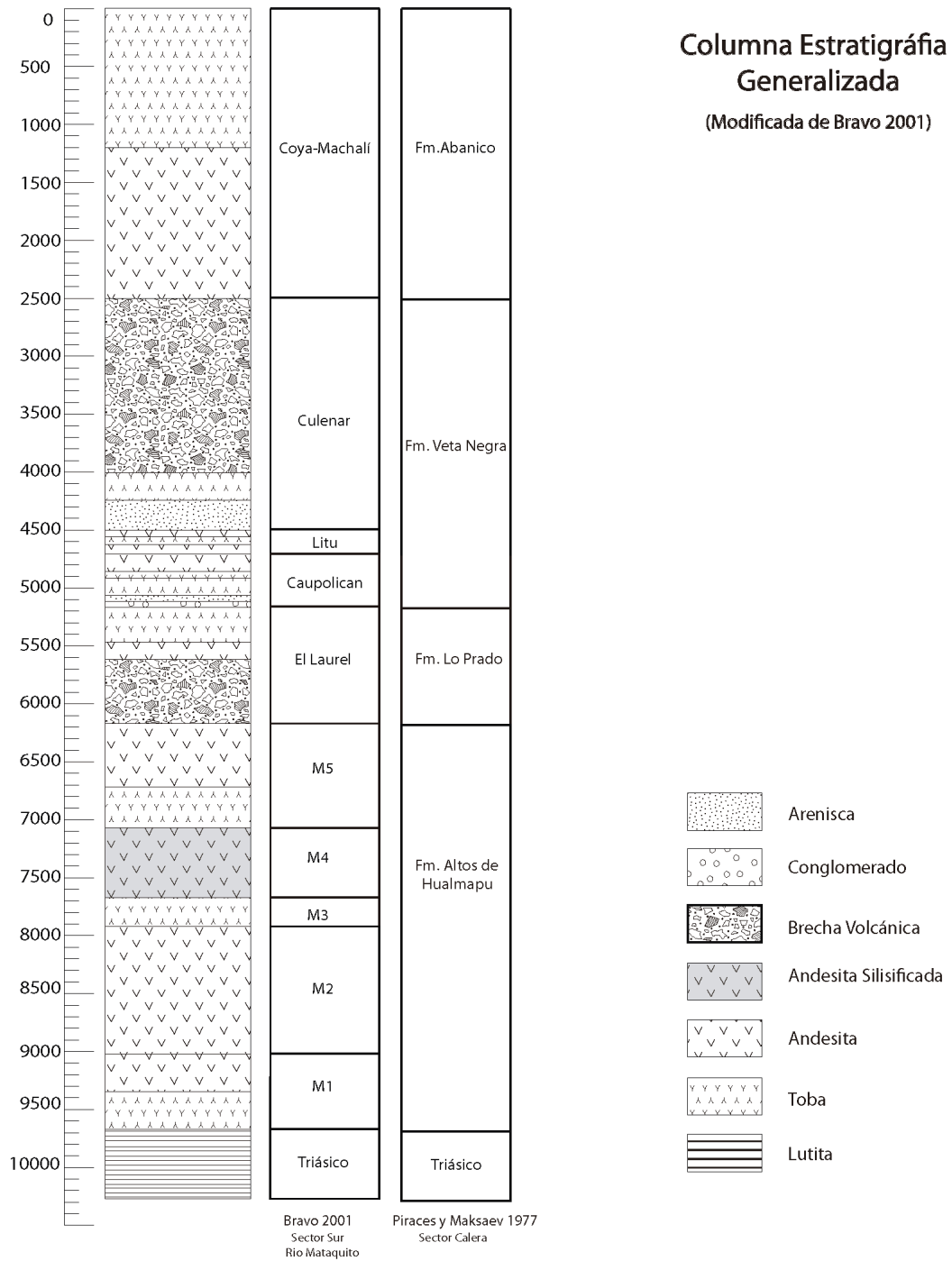
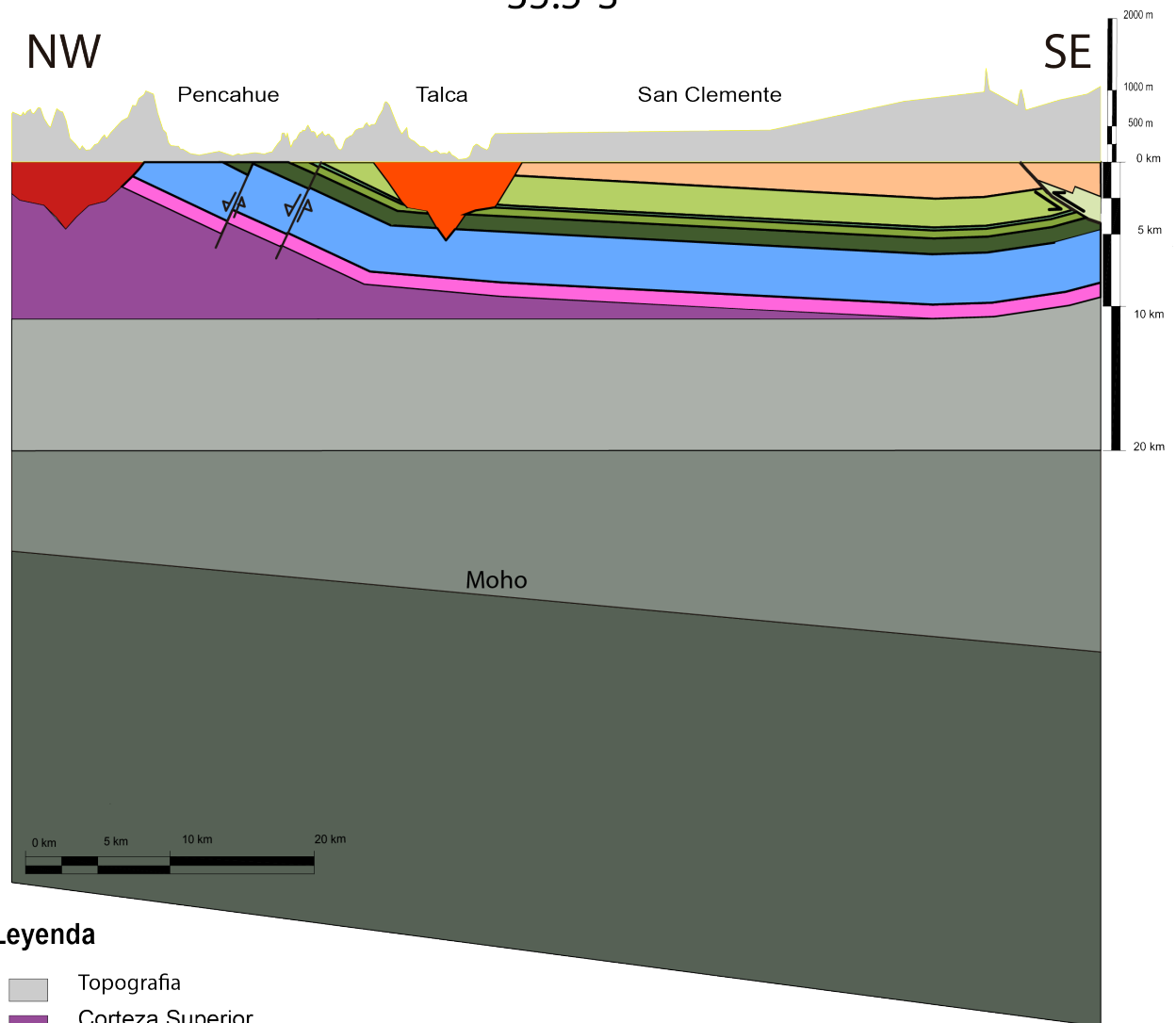


Figura 4.6: Columna estratigráfica en la zona del perfil 1, modificada de (Bravo, 2001).

Perfil Estructural 35.5°S



Leyenda

- Topografía
- Corteza Superior
- Corteza Media
- Corteza Inferior
- Manto Litosférico

Rocas Estratificadas

- OMa: Formación Abanico
- Kcul: Formación El Culenar
- Klit: Estratos de Litu
- Kcc: Ignimbritas de Cerro Caupolicán
- Klau: Estratos de El Laurel
- Jmah: Formación Altos de Hualmapu
- Tr: Triásico-Jurásico

Rocas Intrusivas

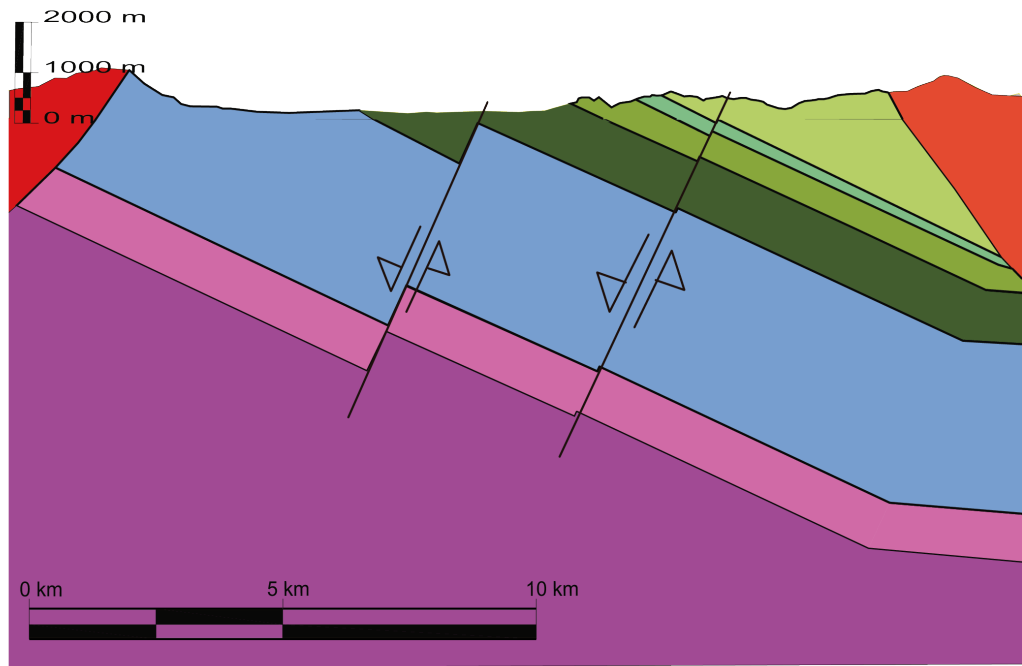
- Intrusivo Cretácico
- Intrusivo Jurásico

Estructuras

- Falla normal
- Falla inversa

Figura 4.7: Perfil estructural propuesto para la cuenca de Talca y Pencahue, hasta el manto litosférico.

Pencahue



Leyenda

Rocas Estratificadas

- Kcul: Formación El Culenar
- Klit: Estratos de Litu
- Kcc: Ignimbritas de Cerro Caupolicán
- Klau: Estratos de El Laurel
- Jmah: Formación Altos de Hualmapu
- Tr: Triásico-Jurásico
- Corteza Superior

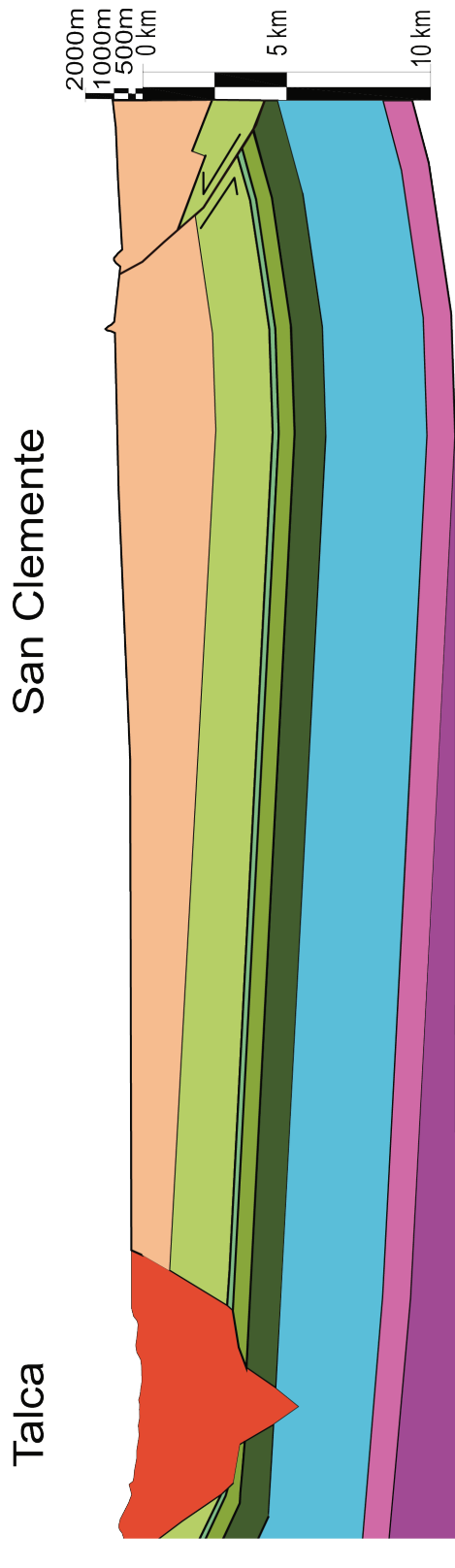
Rocas Intrusivas

- Intrusivo Cretácico
- Intrusivo Jurásico

Estructuras

- Falla normal

Figura 4.9: Perfil estructural propuesto para la cuenca de Pencahue. Corteza superior.



Leyenda

Rocas Estratificadas

- OMa: Formación Abanico
- Kcul: Formación El Culenar
- Klit: Estratos de Litu
- Kcc: Ignimbritas de Cerro Caupolicán
- Klau: Estratos de El Laurel
- Jmah: Formación Altos de Hualmapu
- Tr: Triásico-Jurásico
- Corteza Superior

Rocas Intrusivas

- Intrusivo Cretácico
- Intrusivo Jurásico

Estructuras

- Falla inversa

Figura 4.8: Perfil estructural propuesto para la cuenca de Talca. Corteza superior.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Producción de calor radiogénico

5.1.1. Producción de calor radiogénico de la corteza superior

A continuación se presentan las mediciones efectuadas en los distintos puntos del el área de estudio, ordenados por unidad geológica. Las tablas contienen: identificación que corresponde al número de medición del instrumento (Id), ubicación de donde fue tomada la medición, las concentraciones de U, Th y K acompañadas del error asociado al instrumento de medición, el RHP estimado a partir de las concentraciones de los elementos radiógenos medidos, con la desviación estándar de las mediciones, el promedio de Th/U y el promedio de K/U.

5.2. Rocas Metamórficas

5.2.1. Basamento Metamórfico (Bm)

Estas rocas de carácter metamórfico de grado bajo-medio, de origen sedimentario, presentan un alto RHP medido con una mediana para estas rocas de $2,8 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,5. En comparación con la media mundial de $1,990 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 1,011. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil 75, el cual presenta una mediana de $2,765 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.1: Resumen datos para: Basamento Metamórfico

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	K/U ($\times 10^4$)
63	-35.2621116	-72.1322427	1.9	0.1	2.1	0.8	11.6	1.7	1.5	5.5	0.9
64	-35.2621116	-72.1322427	2.8	0.1	3.0	0.8	15.9	1.7	2.2	5.3	0.9
65	-35.2621116	-72.1322427	2.2	0.1	3.5	0.8	14.4	1.7	2.1	4.1	0.6
66	-35.2621116	-72.1322427	3.5	0.1	3.1	0.8	21.5	1.7	2.7	6.9	1.1
67	-35.2621116	-72.1322427	2.6	0.1	2.7	0.8	15.9	1.7	2.1	5.9	1.0
68	-35.2621116	-72.1322427	3.2	0.1	2.5	0.8	20.4	1.7	2.4	8.2	1.3
69	-35.2637784	-72.1276562	4.3	0.1	3.7	0.8	20.6	1.7	2.8	5.6	1.2
70	-35.2637784	-72.1276562	4.5	0.1	3.7	0.8	22.1	1.7	3.0	6.0	1.2
71	-35.2637743	-72.1248321	4.2	0.1	3.4	0.8	24.6	1.7	3.0	7.2	1.2
72	-35.2643992	-72.1245792	3.8	0.1	4.3	0.8	22.1	1.7	3.0	5.1	0.9
73	-35.2643992	-72.1245792	3.7	0.1	4.7	0.8	20.0	1.7	3.0	4.3	0.8
74	-35.2643992	-72.1245792	3.7	0.1	3.2	0.8	21.9	1.7	2.7	6.8	1.2
75	-35.2642901	-72.1196158	3.6	0.1	2.3	0.8	25.3	1.7	2.7	11.0	1.6
76	-35.2642901	-72.1196158	4.3	0.1	3.7	0.8	26.3	1.7	3.2	7.1	1.2
77	-35.2350342	-72.0708761	2.7	0.1	1.6	0.8	17.3	1.7	1.9	10.8	1.7
78	-35.2350342	-72.0708761	3.6	0.1	4.4	0.8	20.0	1.7	2.9	4.5	0.8
79	-35.2350342	-72.0708761	2.7	0.1	2.7	0.8	22.7	1.7	2.6	8.4	1.0
567	-35.4838220	-72.2304870	3.9	0.1	5.2	0.8	19.3	1.7	3.1	3.7	0.8
568	-35.4839470	-72.2305580	2.3	0.1	2.1	0.8	14.5	1.7	1.8	6.9	1.1
569	-35.4841800	-72.2306500	4.2	0.1	4.1	0.8	21.6	1.7	3.0	5.3	1.0
570	-35.4842580	-72.2308250	4.1	0.1	2.5	0.8	24.9	1.7	2.8	10.0	1.6
571	-35.4843080	-72.2306520	4.3	0.1	2.2	0.8	22.7	1.7	2.6	10.3	2.0
572	-35.4840220	-72.2304320	3.6	0.1	4.1	0.8	19.6	1.7	2.8	4.8	0.9
573	-35.5050630	-72.2097080	4.6	0.1	4.2	0.8	27.9	1.7	3.5	6.6	1.1
574	-35.5050420	-72.2096700	4.6	0.1	4.3	0.8	26.9	1.7	3.5	6.3	1.1
		Mediana	3.7		3.4		21.5		2.8	6.3	1.1
	Densidad (kg/m^3)		2750								
	Mediana RHP ($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	2.8	0.5	1.5	3.5							

5.3. Rocas Estratificadas

5.3.1. Triásico superior-Jurásico inferior (Tr)

Estas rocas de carácter sedimentario, de origen marino, presentan un RHP medido, con una mediana para estas rocas de $1,9 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,5. En comparación con la mediana mundial de $1,392 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,702. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil 90, el cual presenta una mediana de $1,827 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.2: Resumen datos para: Triásico-Jurásico

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	K/U ($\times 10^4$)
88	-35.278458	-71.9764003	2.8	0.1	2.0	0.8	19.7	1.7	2.1	9.9	1.4
89	-35.278458	-71.9764003	2.9	0.1	2.1	0.8	16.1	1.7	1.9	7.7	1.4
90	-35.278458	-71.9764003	2.9	0.1	2.5	0.8	15.8	1.7	2.0	6.3	1.2
91	-35.2844794	-71.9749061	2.6	0.1	3.5	0.8	11.2	1.7	1.9	3.2	0.7
92	-35.2844794	-71.9749061	2.9	0.1	1.9	0.8	15.3	1.7	1.8	8.1	1.5
93	-35.2844794	-71.9749061	3.1	0.1	2.0	0.8	16.9	1.7	1.9	8.5	1.6
94	-35.2881719	-71.9750193	1.4	0.1	1.6	0.4	6.2	0.5	1.0	3.9	0.9
95	-35.2881719	-71.9750193	1.3	0.1	1.7	0.4	6.2	0.5	1.0	3.6	0.8
Mediana			2.9		2.0		15.6		1.9	7.0	1.3
Densidad (kg/m^3)			2650								
Mediana RHP ($\mu W/m^3$)			Desv. Est.	Mínimo	Máximo						
			1.9	0.5	1.0	2.1					

5.3.2. Formación Altos de Hualmapu (Jmah)

Estas rocas de carácter volcánico andesítico, presenta un RHP medido, con una mediana para estas rocas de $1,7 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,5. es comparable con la mediana mundial para andesitas de $0,781 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,362. Las rocas en estudio se ubicarían en el rango máximo, el cual presenta una mediana de $1,416 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.3: Resumen datos para: Altos de Hualmapu

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	K/U ($\times 10^4$)
112	-35.3748882	-71.8664738	3.6	0.1	1.5	0.4	6.7	0.5	1.1	4.5	2.4
113	-35.3748882	-71.8664738	4.2	0.1	1.3	0.4	8.1	0.5	1.2	6.2	3.2
114	-35.3748882	-71.8664738	7.0	0.2	1.7	0.5	7.3	0.5	1.5	4.3	4.1
115	-35.3748882	-71.8664738	6.6	0.2	2.0	0.5	6.3	0.5	1.5	3.2	3.3
116	-35.3748882	-71.8664738	6.3	0.2	1.5	0.5	7.3	0.5	1.4	4.9	4.2
117	-35.369566	-71.8617189	7.3	0.2	2.2	0.5	6.8	0.5	1.7	3.1	3.3
118	-35.369566	-71.8617189	5.1	0.2	1.2	0.5	6.8	0.5	1.2	5.7	4.3
119	-35.369566	-71.8617189	5.8	0.2	1.6	0.5	7.0	0.5	1.4	4.4	3.6
120	-35.3702667	-71.8587726	6.2	0.2	0.9	0.4	8.8	0.5	1.4	9.8	6.9
121	-35.3702667	-71.8587726	5.5	0.2	1.0	0.5	6.9	0.5	1.2	6.9	5.5
122	-35.3702667	-71.8587726	6.3	0.2	1.4	0.5	6.7	0.5	1.4	4.8	4.5
277	-35.178598	-71.748713	7.1	0.2	1.8	0.5	9.1	0.5	1.7	5.1	3.9
278	-35.178583	-71.748672	6.3	0.2	2.1	0.5	9.6	0.5	1.7	4.6	3.0
279	-35.178578	-71.748658	6.8	0.2	1.8	0.9	11.5	1.7	1.8	6.4	3.8
280	-35.178522	-71.748718	7.3	0.2	2.7	0.5	8.7	0.5	1.9	3.2	2.7
281	-35.178578	-71.748623	7.1	0.2	1.6	0.9	12.0	1.7	1.8	7.5	4.4

Continúa en la página siguiente

Continuación de la página anterior											
Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
282	-35.18235	-71.752025	4.6	0.1	1.8	0.4	8.4	0.5	1.4	4.7	2.6
283	-35.182377	-71.752025	4.4	0.1	1.8	0.8	11.8	1.7	1.6	6.6	2.4
284	-35.182313	-71.752037	4.4	0.1	2.4	0.8	10.2	1.7	1.7	4.3	1.8
285	-35.182282	-71.75204	4.0	0.1	1.9	0.8	10.8	1.7	1.5	5.7	2.1
737	-35.456908	-71.906993	4.7	0.2	2.9	0.3	13.8	1.7	2.1	4.8	1.6
738	-35.456832	-71.90702	4.7	0.2	2.3	0.3	15.3	1.7	2.0	6.7	2.0
739	-35.4605	-71.899412	9.9	0.3	3.1	0.3	14.4	1.7	2.6	4.6	3.2
740	-35.460428	-71.89943	10.3	0.3	2.5	0.3	15.0	1.7	2.5	6.0	4.1
741	-35.460428	-71.899382	9.4	0.3	3.7	0.3	15.1	1.7	2.8	4.1	2.5
742	-35.46311	-71.894528	6.2	0.3	2.7	0.3	15.4	1.7	2.2	5.7	2.3
743	-35.463212	-71.894573	5.7	0.3	2.4	0.3	16.0	1.7	2.2	6.7	2.4
744	-35.46321	-71.894427	6.3	0.3	3.6	0.3	15.0	1.7	2.5	4.2	1.8
745	-35.463158	-71.894435	6.6	0.3	3.6	0.3	14.8	1.7	2.5	4.1	1.8
		Mediana	6.3		1.9		9.6		1.7	4.8	3.2
	Densidad (kg/m^3)		2590								
	Mediana RHP($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	1.7	0.5	1.1	2.8							

5.3.3. Formación Estratos del Laurel (Klau)

Estas rocas de carácter volcánico andesítico, presenta un RHP medido con una mediana para estas rocas de $1,0 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,1, es comparable con la mediana mundial para andesitas de $0,781 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,362. Las rocas en estudio se ubicarían en el rango del percentil 75, el cual presenta una mediana de $1,904 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.4: Resumen datos para: Estratos del Laurel

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
657	-35.46928	-71.787258	3.3	0.1	0.8	0.1	6.8	0.5	0.9	8.5	4.1
658	-35.469358	-71.787168	3.1	0.2	1.7	0.3	5.7	0.6	1.1	3.4	1.8
659	-35.46936	-71.78719	3.3	0.2	1.6	0.3	6.4	0.6	1.1	4.0	2.1
660	-35.469368	-71.787272	4.6	0.1	0.6	0.1	6.2	0.5	1.0	10.3	7.7
		Mediana	3.3		1.2		6.3		1.0	6.3	3.1
	Densidad (kg/m^3)		2550								
	Mediana RHP ($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	1.0	0.1	1.0	1.1							

5.3.4. Ignimbritas de Cerro Caupolican (Kcc)

Estas rocas de carácter piroclástico, presentan un RHP medido en estas rocas con un promedio de $2,8 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 1,0. Este grupo no tiene comparación directa con las recopilación de Vilà 2010, así que lo podemos comparar con el promedio para las rocas volcánicas tipo riolita cuya mediana mundial de $2,671 \mu W/m^3$ para estas rocas y una desviación estándar de 1,385. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil 50, el cual presenta una mediana de $2,551 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.5: Resumen datos para: Ignimbritas de Cerro Caupolican

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	K/U ($\times 10^4$)
123	-35.4167976	-71.7743699	4.6	0.1	3.8	0.8	23.6	1.7	2.9	6.2	1.2
124	-35.4167976	-71.7743699	4.7	0.1	4.1	0.8	23.4	1.7	2.9	5.7	1.1
125	-35.4167976	-71.7743699	4.4	0.1	3.9	0.8	25.0	1.7	3.0	6.4	1.1
126	-35.4167976	-71.7743699	4.5	0.1	4.5	0.8	26.2	1.7	3.2	5.8	1.0
127	-35.4167976	-71.7743699	4.5	0.1	4.0	0.8	27.4	1.7	3.1	6.9	1.1
128	-35.4135943	-71.7702083	4.8	0.1	3.5	0.8	21.8	1.7	2.7	6.2	1.4
129	-35.4135943	-71.7702083	4.9	0.1	3.3	0.8	19.5	1.7	2.5	5.9	1.5
130	-35.4135943	-71.7702083	5.1	0.2	5.5	0.9	30.7	1.7	3.8	5.6	0.9
131	-35.4135943	-71.7702083	4.4	0.1	6.4	0.8	27.6	1.7	3.7	4.3	0.7
132	-35.4135943	-71.7702083	5.4	0.2	4.6	0.9	28.9	1.7	3.5	6.3	1.2
296	-35.220953	-71.71767	5.1	0.2	4.7	0.9	23.8	1.7	3.1	5.1	1.1
297	-35.22099	-71.717738	4.6	0.1	3.5	0.8	22.9	1.7	2.7	6.5	1.3
298	-35.220993	-71.717723	4.3	0.1	5.4	0.8	16.8	1.7	2.8	3.1	0.8
299	-35.221023	-71.717713	5.0	0.2	6.0	0.9	21.2	1.7	3.3	3.5	0.8
300	-35.221105	-71.717638	5.1	0.2	3.6	0.9	20.8	1.7	2.7	5.8	1.4
301	-35.22518	-71.718085	3.6	0.1	3.9	0.8	17.5	1.7	2.4	4.5	0.9
302	-35.225192	-71.718108	5.1	0.2	3.8	0.9	24.5	1.7	3.0	6.4	1.3
303	-35.225198	-71.718135	3.8	0.1	6.0	0.8	21.6	1.7	3.2	3.6	0.6
304	-35.225332	-71.718185	4.2	0.1	5.0	0.8	20.5	1.7	2.9	4.1	0.8
305	-35.22524	-71.718097	4.7	0.1	3.8	0.8	19.1	1.7	2.6	5.0	1.2
647	-35.50115	-71.762595	2.4	0.2	1.9	0.3	9.7	0.6	1.3	5.1	1.3
648	-35.501083	-71.762568	1.8	0.2	2.3	0.3	6.8	0.6	1.2	3.0	0.8
649	-35.50117	-71.762592	2.3	0.2	2.6	0.3	9.2	0.6	1.4	3.5	0.9
650	-35.501102	-71.762488	2.1	0.2	3.1	0.3	7.6	0.6	1.4	2.5	0.7
651	-35.501173	-71.762553	2.7	0.2	2.3	0.3	7.8	0.6	1.3	3.4	1.2
652	-35.494712	-71.765533	1.7	0.2	1.5	0.3	5.6	0.6	0.9	3.7	1.1
653	-35.4947	-71.765557	1.8	0.2	2.0	0.3	5.2	0.6	1.0	2.6	0.9
654	-35.494632	-71.765615	1.8	0.2	1.0	0.3	6.3	0.6	0.8	6.3	1.8
655	-35.494638	-71.765563	1.7	0.1	0.9	0.1	6.1	0.5	0.8	6.8	1.9
656	-35.494565	-71.765553	1.8	0.2	1.2	0.3	6.4	0.6	0.9	5.3	1.5
746	-35.4132	-71.77118	5.0	0.4	6.0	0.3	33.4	1.7	4.1	5.6	0.8
747	-35.413205	-71.771183	4.5	0.3	5.7	0.3	31.8	1.7	3.8	5.6	0.8
748	-35.413182	-71.771225	5.2	0.4	7.2	0.3	27.8	1.7	4.0	3.9	0.7
		Mediana	4.5		3.8		21.2		2.8	5.3	1.1
	Densidad (kg/m^3)		2540								
	Mediana RHP($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	2.8	1.0	0.8	4.1							

5.3.5. Formación Estratos de Litú (Klit)

Estas rocas de carácter piroclástico, presentan un RHP medido con un promedio en estas rocas de $1,7 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,8. Este grupo no tiene comparación directa con las recopilación de Vilà 2010, así que lo podemos comparar con el promedio para las rocas volcánicas tipo riolita cuya mediana mundial de $2,671 \mu W/m^3$ para estas rocas y una desviación estándar de 1,385. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil 25, el cual presenta una mediana de $1,847 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.6: Resumen datos para: Estratos de Litú

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
286	-35.20565	-71.706722	2.1	0.1	2.3	0.8	10.5	1.7	1.4	4.6	0.9
287	-35.20562	-71.706702	2.3	0.1	2.0	0.4	9.7	0.5	1.3	4.9	1.2
288	-35.205553	-71.706652	1.4	0.1	3.1	0.8	10.2	1.7	1.6	3.3	0.5
289	-35.205623	-71.706733	2.4	0.1	2.4	0.4	9.3	0.5	1.4	3.9	1.0
291	-35.205603	-71.706597	2.5	0.1	2.0	0.8	9.8	1.7	1.4	4.9	1.3
292	-35.207387	-71.708138	1.8	0.1	4.3	0.4	13.4	0.5	2.1	3.1	0.4
293	-35.207485	-71.708205	1.6	0.1	2.8	0.8	14.8	1.7	1.8	5.3	0.6
294	-35.207562	-71.708322	2.1	0.1	2.7	0.8	12.9	1.7	1.7	4.8	0.8
295	-35.207527	-71.708245	1.5	0.1	3.4	0.8	13.0	1.7	1.8	3.8	0.4
306	-35.255318	-71.701283	4.7	0.1	3.0	0.8	22.1	1.7	2.6	7.4	1.6
307	-35.255308	-71.701287	5.1	0.1	6.4	0.8	22.5	1.7	3.5	3.5	0.8
308	-35.255332	-71.701232	4.9	0.2	4.4	0.9	21.3	1.7	2.9	4.8	1.1
309	-35.255302	-71.701205	4.8	0.1	4.6	0.8	17.8	1.7	2.7	3.9	1.0
310	-35.255082	-71.701303	4.2	0.1	5.4	0.8	16.0	1.7	2.7	3.0	0.8
383	-35.318232	-71.73696	3.0	0.1	2.6	0.8	7.3	1.7	1.4	2.8	1.2
384	-35.31828	-71.736932	1.8	0.1	0.7	0.3	4.8	0.5	0.6	6.9	2.6
385	-35.318373	-71.737028	2.8	0.1	1.1	0.4	6.9	0.5	1.0	6.3	2.5
386	-35.318475	-71.736885	1.3	0.1	0.9	0.3	2.8	0.5	0.5	3.1	1.4
387	-35.318513	-71.736837	0.9	0.0	0.8	0.2	4.4	0.5	0.6	5.5	1.1
388	-35.318425	-71.736937	3.1	0.1	0.7	0.3	2.4	0.5	0.6	3.4	4.4
389	-35.325053	-71.721798	4.4	0.1	4.1	0.8	19.0	1.7	2.6	4.6	1.1
390	-35.324957	-71.72175	4.5	0.1	2.9	0.8	22.9	1.7	2.6	7.9	1.6
391	-35.32502	-71.72173	4.3	0.1	3.6	0.8	21.5	1.7	2.7	6.0	1.2
392	-35.32501	-71.72176	2.8	0.1	3.0	0.8	14.8	1.7	2.0	4.9	0.9
393	-35.32504	-71.721907	3.8	0.1	2.2	0.8	19.5	1.7	2.2	8.9	1.7
394	-35.325088	-71.721953	4.6	0.1	2.9	0.8	21.7	1.7	2.5	7.5	1.6
395	-35.325143	-71.722097	3.6	0.1	2.3	0.8	20.4	1.7	2.2	8.9	1.6
702	-35.074178	-71.595473	2.5	0.2	2.8	0.3	12.8	1.7	1.8	4.6	0.9
703	-35.074188	-71.595503	2.5	0.2	2.2	0.3	8.6	0.6	1.3	3.9	1.1
704	-35.074112	-71.59544	2.6	0.2	1.9	0.3	8.3	0.6	1.2	4.4	1.4
705	-35.07416	-71.595348	2.8	0.2	1.2	0.3	8.8	0.6	1.1	7.3	2.3
706	-35.07418	-71.595393	2.4	0.2	2.3	0.3	8.6	0.6	1.3	3.7	1.0
707	-35.0742	-71.595495	2.9	0.2	2.0	0.3	13.1	1.7	1.6	6.6	1.5
		Mediana	2.8		2.6		12.9		1.7	4.8	1.1
	Densidad (kg/m^3)		2570								
	Mediana RHP ($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	1.7	0.8	0.5	3.5							

5.3.6. Formación Culenar (Kcul)

Estas rocas de carácter ígneo efusivo, que incluyen tobas y lavas, algunas con alteración presentan un RHP medido en estas rocas con una mediana de $1,3 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,8. En comparación con la mediana mundial de $0,781 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,362. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil, el cual presenta una mediana de $1,094 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.7: Resumen datos para: Culenar

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
133	-35.41826	-71.7240234	1.0	0.1	0.1	0.3	6.3	0.5	0.5	63.0	10.0
134	-35.41826	-71.7240234	0.6	0.0	0.9	0.2	4.5	0.5	0.6	5.0	0.7
135	-35.41826	-71.7240234	1.2	0.1	1.1	0.4	4.3	0.5	0.6	3.9	1.1
136	-35.41826	-71.7240234	1.0	0.1	1.0	0.4	3.8	0.5	0.6	3.8	1.0
137	-35.41826	-71.7240234	0.8	0.1	1.1	0.4	2.6	0.5	0.5	2.4	0.7
138	-35.4181633	-71.7235137	1.4	0.1	0.8	0.3	3.6	0.5	0.5	4.5	1.8
139	-35.4181633	-71.7235137	0.7	0.0	0.5	0.2	4.1	0.5	0.4	8.2	1.4
140	-35.4180569	-71.7218364	1.0	0.1	1.1	0.4	3.8	0.5	0.6	3.5	0.9
141	-35.4180569	-71.7218364	1.0	0.1	0.9	0.3	4.4	0.5	0.6	4.9	1.1
142	-35.4180569	-71.7218364	1.7	0.1	0.8	0.3	4.2	0.5	0.6	5.3	2.1
397	-35.336333	-71.706842	0.1	0.1	5.1	0.8	17.7	1.7	2.4	3.5	0.0
398	-35.33626	-71.70689	0.5	0.1	3.3	0.8	10.4	1.7	1.5	3.2	0.2
399	-35.33628	-71.706915	0.2	0.1	2.0	0.4	9.2	0.5	1.1	4.6	0.1
400	-35.336317	-71.706697	0.3	0.1	7.0	0.8	14.1	1.7	2.6	2.0	0.0
401	-35.336278	-71.706855	0.2	0.1	3.4	0.8	12.8	1.7	1.7	3.8	0.1
402	-35.33632	-71.706822	0.4	0.1	3.4	0.8	17.9	1.7	2.0	5.3	0.1
403	-35.335147	-71.696578	3.4	0.1	5.2	0.8	17.9	1.7	2.7	3.4	0.7
404	-35.335162	-71.696642	3.8	0.1	3.6	0.8	19.4	1.7	2.4	5.4	1.1
405	-35.335178	-71.696583	3.5	0.1	4.5	0.8	15.4	1.7	2.4	3.4	0.8
406	-35.340293	-71.69879	0.5	0.1	6.4	0.8	31.6	1.7	3.6	4.9	0.1
407	-35.340173	-71.698783	2.5	0.1	5.3	0.8	34.1	1.7	3.7	6.4	0.5
408	-35.340115	-71.698763	3.1	0.1	5.6	0.8	31.7	1.7	3.7	5.7	0.6
409	-35.340205	-71.698692	0.7	0.1	6.0	0.8	19.1	1.7	2.7	3.2	0.1
410	-35.340212	-71.699	3.7	0.1	6.0	0.8	29.1	1.7	3.6	4.9	0.6
411	-35.356507	-71.693662	0.8	0.0	0.1	0.2	2.8	0.5	0.3	28.0	8.0
412	-35.356495	-71.693683	0.7	0.0	0.3	0.2	3.5	0.5	0.4	11.7	2.3
413	-35.356518	-71.693677	0.9	0.0	0.6	0.2	3.3	0.5	0.4	5.5	1.5
414	-35.356515	-71.693678	0.6	0.0	0.7	0.2	2.7	0.5	0.4	3.9	0.9
415	-35.35657	-71.693667	1.0	0.1	0.5	0.3	3.3	0.5	0.4	6.6	2.0
416	-35.35656	-71.693642	0.8	0.0	0.7	0.2	2.7	0.5	0.4	3.9	1.1
417	-35.384407	-71.679663	0.5	0.0	0.4	0.2	1.8	0.5	0.3	4.5	1.3
418	-35.384398	-71.679683	0.7	0.0	0.3	0.2	2.5	0.5	0.3	8.3	2.3
419	-35.384388	-71.679667	0.6	0.0	0.3	0.2	2.0	0.5	0.3	6.7	2.0
420	-35.472787	-71.64473	0.6	0.0	0.0	0.2	1.5	0.5	0.1	-	-
421	-35.472775	-71.644728	0.5	0.0	0.0	0.2	1.3	0.5	0.1	-	-
422	-35.472782	-71.64477	0.4	0.0	0.0	0.2	1.0	0.5	0.1	-	-
423	-35.472975	-71.644772	0.8	0.0	0.0	0.2	1.6	0.5	0.2	-	-
424	-35.472985	-71.644867	0.6	0.0	0.0	0.2	2.1	0.5	0.2	-	-
619	-35.421473	-71.61579	3.0	0.1	0.8	0.1	7.9	0.5	1.0	9.9	3.8
620	-35.421473	-71.61579	2.6	0.2	1.5	0.3	6.4	0.6	1.0	4.3	1.7
621	-35.421508	-71.615842	0.9	0.2	0.6	0.3	4.5	0.6	0.5	7.5	1.5
622	-35.421493	-71.615637	1.6	0.2	2.0	0.3	4.0	0.6	0.9	2.0	0.8
688	-35.07019	-71.579497	3.8	0.2	4.7	0.3	17.4	1.7	2.6	3.7	0.8
689	-35.070333	-71.579335	4.1	0.3	6.2	0.3	17.3	1.7	3.0	2.8	0.7
690	-35.070422	-71.579142	4.1	0.2	3.3	0.3	22.6	1.7	2.6	6.8	1.2
691	-35.070473	-71.57908	4.1	0.2	4.3	0.3	18.1	1.7	2.6	4.2	1.0
692	-35.070358	-71.579007	1.5	0.2	3.3	0.3	9.7	1.7	1.5	2.9	0.5
693	-35.070325	-71.579037	1.5	0.2	1.8	0.3	7.4	1.7	1.0	4.1	0.8
694	-35.070313	-71.579052	1.8	0.2	1.5	0.3	8.5	1.7	1.1	5.7	1.2
695	-35.070315	-71.579025	3.4	0.2	3.8	0.3	17.0	1.7	2.3	4.5	0.9
696	-35.070217	-71.578967	3.7	0.2	3.9	0.3	16.2	1.7	2.3	4.2	0.9
697	-35.070217	-71.578908	3.1	0.2	3.7	0.3	15.1	1.7	2.1	4.1	0.8

Continúa en la página siguiente

Continuación de la página anterior											
Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
698	-35.070278	-71.578952	4.1	0.2	4.0	0.3	16.4	1.7	2.4	4.1	1.0
699	-35.070247	-71.578958	4.3	0.2	3.6	0.3	16.5	1.7	2.3	4.6	1.2
700	-35.070328	-71.579033	4.1	0.2	4.3	0.3	15.9	1.7	2.4	3.7	1.0
701	-35.07012	-71.578783	3.5	0.2	5.8	0.3	14.2	1.7	2.6	2.4	0.6
708	-35.172913	-71.563203	2.7	0.2	1.4	0.3	7.7	0.6	1.1	5.5	1.9
709	-35.172907	-71.56316	2.6	0.2	1.3	0.3	8.1	0.6	1.1	6.2	2.0
710	-35.17288	-71.5634	2.7	0.2	3.0	0.3	12.3	1.7	1.7	4.1	0.9
711	-35.17262	-71.563322	2.5	0.2	2.6	0.3	10.6	1.7	1.5	4.1	1.0
712	-35.172698	-71.563333	2.7	0.2	2.6	0.3	11.0	1.7	1.6	4.2	1.0
713	-35.172715	-71.563443	2.6	0.2	2.7	0.3	12.8	1.7	1.7	4.7	1.0
714	-35.187067	-71.534613	2.7	0.2	2.2	0.3	8.4	0.6	1.3	3.8	1.2
715	-35.187012	-71.534655	3.0	0.2	1.3	0.3	9.6	0.6	1.2	7.4	2.3
716	-35.187028	-71.534637	3.2	0.2	2.0	0.3	8.7	0.6	1.3	4.4	1.6
717	-35.187025	-71.534628	3.1	0.2	2.1	0.3	9.0	0.6	1.4	4.3	1.5
718	-35.224577	-71.540025	3.1	0.2	3.4	0.3	11.5	1.7	1.8	3.4	0.9
719	-35.224658	-71.540115	3.1	0.2	3.4	0.3	11.5	1.7	1.8	3.4	0.9
721	-35.224485	-71.540005	2.7	0.2	2.8	0.3	10.2	1.7	1.6	3.6	1.0
		Mediana	1.6		2		9		1.3	4.3	1.0
	Densidad (kg/m^3)		2520								
	Mediana RHP ($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	1.3	0.8	0.1	3.7							

5.3.7. Formación Abanico (OMa)

Estas rocas de carácter ígneo efusivo, que incluyen tobas y lavas, algunas con alteración presentan un RHP medido para estas rocas una mediana de $0,4 \mu W/m^3$ con una desviación estándar de 0,5. En comparación con la mediana mundial de $0,970 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 1,13. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil, el cual presenta una mediana de $0,573 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.8: Resumen datos para: Abanico

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
194	-35.549475	-71.223045	0.5	0.0	0.6	0.2	5.4	0.5	0.5	9.0	0.8
195	-35.549475	-71.223045	0.4	0.0	0.5	0.2	5.7	0.5	0.5	11.4	0.8
196	-35.549437	-71.22304	0.2	0.1	1.2	0.4	6.0	0.5	0.7	5.0	0.2
197	-35.54945	-71.223022	0.3	0.1	1.3	0.4	5.4	0.5	0.7	4.2	0.2
198	-35.549442	-71.223083	0.4	0.1	1.0	0.4	5.1	0.5	0.6	5.1	0.4
199	-35.549595	-71.222968	1.1	0.1	0.2	0.3	2.1	0.5	0.3	10.5	5.5
200	-35.549608	-71.222993	0.3	0.1	1.2	0.4	5.9	0.5	0.7	4.9	0.3
201	-35.549593	-71.222927	0.9	0.0	0.2	0.2	2.9	0.5	0.3	14.5	4.5
202	-35.549762	-71.222915	0.6	0.0	0.4	0.2	2.4	0.5	0.3	6.0	1.5
203	-35.535247	-71.264682	0.2	0.0	0.2	0.2	1.2	0.5	0.1	6.0	1.0
204	-35.535237	-71.264617	0.2	0.0	0.0	0.2	1.4	0.5	0.1	-	-
205	-35.535278	-71.2645	0.3	0.0	0.3	0.2	1.8	0.5	0.2	6.0	1.0
206	-35.53531	-71.264372	0.3	0.0	0.5	0.2	1.6	0.5	0.3	3.2	0.6
207	-35.535592	-71.264443	0.2	0.0	0.0	0.2	1.4	0.5	0.1	-	-
208	-35.535275	-71.264542	0.3	0.0	0.0	0.2	1.8	0.5	0.1	-	-
209	-35.535258	-71.264668	0.4	0.0	0.3	0.2	1.4	0.5	0.2	4.7	1.3
210	-35.535395	-71.264715	0.3	0.0	0.1	0.2	1.4	0.5	0.1	14.0	3.0
211	-35.53541	-71.264613	0.2	0.0	0.1	0.2	1.3	0.5	0.1	13.0	2.0
212	-35.535163	-71.264945	0.2	0.0	0.0	0.2	2.3	0.5	0.2	-	-
213	-35.429407	-71.282115	1.0	0.1	0.7	0.3	2.2	0.5	0.4	3.1	1.4
214	-35.429382	-71.28205	1.0	0.1	0.0	0.3	4.7	0.5	0.4	-	-
215	-35.429425	-71.281972	1.1	0.1	0.8	0.3	2.7	0.5	0.5	3.4	1.4
216	-35.429485	-71.281898	1.0	0.1	0.5	0.3	3.4	0.5	0.4	6.8	2.0

Continúa en la página siguiente

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
217	-35.42962	-71.281835	1.0	0.1	0.3	0.3	3.1	0.5	0.4	10.3	3.3
218	-35.429603	-71.281758	0.9	0.0	0.8	0.2	2.4	0.5	0.4	3.0	1.1
219	-35.429682	-71.281712	0.5	0.0	0.0	0.2	3.0	0.5	0.2	-	-
220	-35.42975	-71.28169	0.6	0.0	0.6	0.2	1.6	0.5	0.3	2.7	1.0
221	-35.429747	-71.281573	0.4	0.0	0.2	0.2	2.6	0.5	0.3	13.0	2.0
222	-35.429737	-71.281448	0.3	0.0	0.6	0.2	1.8	0.5	0.3	3.0	0.5
223	-35.429943	-71.281472	0.2	0.0	0.7	0.2	2.3	0.5	0.3	3.3	0.3
224	-35.429948	-71.281455	0.6	0.0	0.6	0.2	2.6	0.5	0.4	4.3	1.0
225	-35.429923	-71.281243	0.8	0.0	0.6	0.2	3.2	0.5	0.4	5.3	1.3
226	-35.429938	-71.281098	0.9	0.0	0.0	0.2	3.7	0.5	0.3	-	-
227	-35.430358	-71.28118	1.4	0.1	0.4	0.3	3.7	0.5	0.5	9.3	3.5
228	-35.430258	-71.28108	0.4	0.1	1.0	0.4	2.0	0.5	0.4	2.0	0.4
229	-35.430298	-71.280998	0.9	0.0	0.3	0.2	3.7	0.5	0.4	12.3	3.0
230	-35.430445	-71.280947	1.0	0.1	0.7	0.3	3.0	0.5	0.5	4.3	1.4
231	-35.430435	-71.280375	0.6	0.0	0.4	0.2	2.3	0.5	0.3	5.8	1.5
232	-35.430455	-71.280697	1.2	0.1	0.1	0.3	3.7	0.5	0.4	37.0	12.0
233	-35.430553	-71.280773	1.1	0.1	0.8	0.3	4.1	0.5	0.6	5.1	1.4
234	-35.430538	-71.280815	1.3	0.1	1.1	0.4	3.5	0.5	0.6	3.2	1.2
235	-35.430483	-71.280785	1.3	0.1	0.2	0.3	3.7	0.5	0.4	18.5	6.5
236	-35.43054	-71.28077	1.1	0.1	0.8	0.3	2.5	0.5	0.5	3.1	1.4
237	-35.43053	-71.280883	1.2	0.1	0.3	0.3	4.1	0.5	0.4	13.7	4.0
252	-35.437693	-71.137025	1.0	0.1	0.4	0.3	2.4	0.5	0.3	6.0	2.5
253	-35.437678	-71.13705	0.4	0.0	0.1	0.2	3.7	0.5	0.3	37.0	4.0
254	-35.437625	-71.137108	0.7	0.0	0.6	0.2	3.1	0.5	0.4	5.2	1.2
255	-35.437795	-71.136963	1.4	0.1	0.0	0.3	3.3	0.5	0.3	-	-
256	-35.437725	-71.136995	0.5	0.0	0.2	0.2	3.4	0.5	0.3	17.0	2.5
257	-35.437718	-71.137015	0.3	0.0	0.1	0.2	3.6	0.5	0.3	36.0	3.0
258	-35.437725	-71.136993	0.4	0.0	0.0	0.2	2.8	0.5	0.2	-	-
259	-35.437742	-71.137	1.6	0.1	0.0	0.3	4.1	0.5	0.4	-	-
260	-35.437862	-71.136895	1.2	0.1	0.0	0.3	4.2	0.5	0.4	-	-
261	-35.437723	-71.13692	1.1	0.1	0.5	0.3	3.3	0.5	0.4	6.6	2.2
262	-35.437705	-71.136933	1.0	0.1	0.5	0.3	3.3	0.5	0.4	6.6	2.0
263	-35.437715	-71.136965	1.1	0.1	0.2	0.3	4.2	0.5	0.4	21.0	5.5
264	-35.437687	-71.136957	1.3	0.1	0.6	0.3	3.5	0.5	0.5	5.8	2.2
265	-35.437772	-71.136912	1.2	0.1	0.0	0.3	5.0	0.5	0.4	-	-
266	-35.437748	-71.136963	1.3	0.1	0.4	0.3	3.8	0.5	0.5	9.5	3.3
270	-35.42288	-71.149415	1.0	0.1	1.8	0.4	7.7	0.5	1.0	4.3	0.6
271	-35.422842	-71.149338	1.0	0.1	0.8	0.3	8.6	0.5	0.8	10.8	1.3
272	-35.422835	-71.149307	0.7	0.1	1.2	0.4	6.5	0.5	0.8	5.4	0.6
273	-35.423153	-71.149235	0.1	0.0	0.0	0.2	3.1	0.5	0.2	-	-
274	-35.423167	-71.149375	0.1	0.0	0.5	0.2	2.6	0.5	0.3	5.2	0.2
275	-35.423197	-71.149305	0.3	0.0	0.3	0.2	3.2	0.5	0.3	10.7	1.0
276	-35.423197	-71.149305	0.2	0.0	0.1	0.2	2.9	0.5	0.2	29.0	2.0
322	-35.727328	-71.205195	0.8	0.1	1.8	0.4	4.7	0.5	0.8	2.6	0.4
323	-35.727335	-71.205255	1.0	0.1	0.8	0.3	4.9	0.5	0.6	6.1	1.3
324	-35.727268	-71.20527	0.9	0.1	1.1	0.4	4.3	0.5	0.6	3.9	0.8
325	-35.727147	-71.20536	1.4	0.1	1.0	0.4	3.9	0.5	0.6	3.9	1.4
326	-35.727097	-71.205485	1.1	0.1	0.9	0.3	3.4	0.5	0.5	3.8	1.2
327	-35.726958	-71.205703	1.0	0.1	0.7	0.3	3.8	0.5	0.5	5.4	1.4
328	-35.726702	-71.206228	1.9	0.1	0.7	0.3	5.4	0.5	0.7	7.7	2.7
329	-35.726443	-71.20665	0.9	0.0	0.4	0.2	3.7	0.5	0.4	9.3	2.3
330	-35.724022	-71.212512	0.8	0.0	0.7	0.2	4.3	0.5	0.5	6.1	1.1
331	-35.723923	-71.212372	0.8	0.0	0.6	0.2	3.9	0.5	0.5	6.5	1.3
332	-35.723935	-71.212372	0.7	0.0	0.2	0.2	4.0	0.5	0.4	20.0	3.5
333	-35.723323	-71.215102	0.7	0.0	0.4	0.2	2.2	0.5	0.3	5.5	1.8
334	-35.72333	-71.2152	1.1	0.1	0.8	0.3	3.2	0.5	0.5	4.0	1.4
335	-35.723248	-71.215427	1.4	0.1	0.5	0.3	2.3	0.5	0.4	4.6	2.8
336	-35.72327	-71.215518	1.2	0.1	1.9	0.4	3.1	0.5	0.8	1.6	0.6
337	-35.720645	-71.225462	0.5	0.0	0.0	0.2	2.5	0.5	0.2	-	-
338	-35.720498	-71.225587	0.2	0.0	0.6	0.2	2.4	0.5	0.3	4.0	0.3
339	-35.72041	-71.22554	0.3	0.0	0.6	0.2	2.2	0.5	0.3	3.7	0.5
340	-35.720552	-71.225845	0.2	0.0	0.7	0.2	2.3	0.5	0.3	3.3	0.3
341	-35.720175	-71.225843	3.2	0.1	0.6	0.3	2.5	0.5	0.6	4.2	5.3
342	-35.72018	-71.225828	3.3	0.1	0.4	0.3	3.2	0.5	0.6	8.0	8.3
343	-35.720152	-71.22585	2.2	0.1	0.5	0.3	5.0	0.5	0.6	10.0	4.4

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
344	-35.720142	-71.22589	0.6	0.1	1.7	0.4	4.1	0.5	0.7	2.4	0.4
345	-35.72008	-71.225797	1.0	0.1	0.9	0.3	4.7	0.5	0.6	5.2	1.1
346	-35.720087	-71.225787	0.5	0.1	1.0	0.4	3.1	0.5	0.5	3.1	0.5
347	-35.720063	-71.225878	0.7	0.1	7.8	0.4	9.1	0.5	2.5	1.2	0.1
348	-35.72003	-71.225852	0.9	0.1	5.7	0.8	10.1	1.7	2.1	1.8	0.2
349	-35.72005	-71.225892	1.0	0.1	8.1	0.4	8.5	0.5	2.6	1.0	0.1
350	-35.71998	-71.225827	0.6	0.1	4.6	0.8	10.5	1.7	1.8	2.3	0.1
351	-35.720112	-71.225938	1.3	0.1	6.2	0.4	8.6	0.5	2.2	1.4	0.2
352	-35.72009	-71.225893	0.6	0.1	5.7	0.4	8.8	0.5	2.0	1.5	0.1
353	-35.720078	-71.225912	0.8	0.1	7.8	0.4	9.5	0.5	2.6	1.2	0.1
354	-35.720075	-71.225907	1.5	0.1	5.7	0.8	11.4	1.7	2.3	2.0	0.3
355	-35.720097	-71.225902	0.6	0.1	5.4	0.4	9.6	0.5	2.0	1.8	0.1
356	-35.720067	-71.225957	1.8	0.1	1.8	0.4	3.9	0.5	0.8	2.2	1.0
357	-35.71998	-71.225843	2.4	0.1	0.7	0.3	4.4	0.5	0.7	6.3	3.4
358	-35.71998	-71.225843	2.4	0.1	1.2	0.4	3.3	0.5	0.7	2.8	2.0
359	-35.718975	-71.22928	1.2	0.1	0.4	0.3	3.8	0.5	0.4	9.5	3.0
360	-35.718968	-71.22928	1.3	0.1	0.3	0.3	5.3	0.5	0.5	17.7	4.3
361	-35.727303	-71.245663	0.4	0.0	0.4	0.2	1.8	0.5	0.2	4.5	1.0
362	-35.727147	-71.24565	0.6	0.0	0.3	0.2	1.7	0.5	0.2	5.7	2.0
363	-35.702875	-71.339118	1.4	0.1	0.7	0.3	3.8	0.5	0.5	5.4	2.0
364	-35.703048	-71.339095	1.3	0.1	0.4	0.3	4.6	0.5	0.5	11.5	3.3
365	-35.702953	-71.339007	1.4	0.1	1.0	0.4	3.5	0.5	0.6	3.5	1.4
366	-35.696728	-71.353317	0.5	0.0	0.2	0.2	1.4	0.5	0.2	7.0	2.5
367	-35.696817	-71.353498	0.7	0.0	0.2	0.2	1.7	0.5	0.2	8.5	3.5
368	-35.696952	-71.354073	0.8	0.0	0.3	0.2	1.6	0.5	0.2	5.3	2.7
369	-35.696905	-71.354365	0.6	0.0	0.0	0.2	1.8	0.5	0.2	-	-
370	-35.696805	-71.384722	0.5	0.0	0.2	0.2	2.0	0.5	0.2	10.0	2.5
371	-35.696795	-71.384698	0.4	0.0	0.3	0.2	1.5	0.5	0.2	5.0	1.3
372	-35.696763	-71.384598	0.4	0.0	0.3	0.2	1.5	0.5	0.2	5.0	1.3
373	-35.696793	-71.384562	0.4	0.0	0.2	0.2	1.0	0.5	0.1	5.0	2.0
674	-35.85552	-71.272647	1.9	0.2	1.6	0.3	7.1	0.6	1.0	4.4	1.2
675	-35.855412	-71.272577	2.0	0.2	0.0		8.0		0.7	-	-
676	-35.855367	-71.272492	1.9	0.2	1.0	0.3	7.0	0.6	0.9	7.0	1.9
677	-35.855563	-71.2726	1.4	0.2	1.6	0.3	6.6	0.6	0.9	4.1	0.9
678	-35.855562	-71.272638	1.6	0.2	2.4	0.3	4.9	0.6	1.0	2.0	0.7
679	-35.855595	-71.272632	1.9	0.2	1.6	0.3	7.1	0.6	1.0	4.4	1.2
680	-35.852302	-71.277662	1.5	0.2	1.2	0.3	5.5	0.6	0.8	4.6	1.3
682	-35.852253	-71.27764	1.3	0.2	1.3	0.3	5.0	0.6	0.8	3.8	1.0
684	-35.852287	-71.277752	1.6	0.1	0.1	0.1	5.0	0.5	0.5	50.0	16.0
685	-35.85194	-71.276648	2.0	0.1	0.7	0.1	3.5	0.5	0.6	5.0	2.9
686	-35.851975	-71.276677	1.4	0.1	0.6	0.1	5.8	0.5	0.6	9.7	2.3
687	-35.851983	-71.27666	1.9	0.1	0.6	0.1	5.3	0.5	0.7	8.8	3.2
		Mediana	0.9		0.6		3.5		0.4	5.2	1.4
	Densidad (kg/m^3)		2540								
	Mediana RHP ($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	0.4	0.5	0.1	2.6							

5.4. Rocas Intrusivas

5.4.1. Basamento Granítico (Bg)

Estas rocas de carácter ígneo intrusivo, del tipo granodiorita, algunas con alteración presentan un RHP medido para estas rocas con una mediana de $1,3 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,7. En comparación con la mediana mundial de $2,073 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 1,235. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil 25, el cual presenta una mediana de $1,438 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.9: Resumen datos para: Basamento Granítico

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
80	-35.231124	-72.0247818	4.6	0.1	4.2	0.8	19.2	1.7	2.8	4.6	1.1
81	-35.231124	-72.0247818	3.7	0.1	3.7	0.8	19.0	1.7	2.6	5.1	1.0
82	-35.231124	-72.0247818	3.6	0.1	3.0	0.8	17.8	1.7	2.3	5.9	1.2
83	-35.231124	-72.0247818	3.3	0.1	4.8	0.8	17.7	1.7	2.7	3.7	0.7
84	-35.2368411	-72.0099183	4.1	0.1	1.0	0.4	3.1	0.5	0.8	3.1	4.1
85	-35.2368411	-72.0099183	3.9	0.1	2.9	0.8	14.1	1.7	2.0	4.9	1.3
86	-35.2450565	-71.9953604	1.9	0.1	1.6	0.8	11.2	1.7	1.3	7.0	1.2
87	-35.2450565	-71.9953604	1.9	0.1	1.3	0.8	10.5	1.7	1.2	8.1	1.5
575	-35.551442	-72.142523	1.7	0.1	1.7	0.4	6.7	0.5	1.0	3.9	1.0
576	-35.551465	-72.14251	2.1	0.1	2.3	0.4	8.6	0.5	1.4	3.7	0.9
577	-35.551513	-72.142645	2.0	0.1	0.7	0.3	9.4	0.5	1.0	13.4	2.9
578	-35.551548	-72.14247	2.1	0.1	1.6	0.4	8.3	0.5	1.2	5.2	1.3
579	-35.551552	-72.142528	1.8	0.1	1.2	0.4	8.7	0.5	1.1	7.3	1.5
580	-35.5516	-72.142622	1.8	0.1	1.5	0.4	7.8	0.5	1.1	5.2	1.2
581	-35.551673	-72.142303	3.2	0.1	2.8	0.4	3.2	0.5	1.2	1.1	1.1
582	-35.551755	-72.142248	3.0	0.1	3.7	0.8	10.4	1.7	1.9	2.8	0.8
583	-35.551795	-72.142187	3.3	0.1	3.5	0.8	18.3	1.7	2.4	5.2	0.9
		Mediana	3.0		2.3		10.4		1.3	5.1	1.2
	Densidad (kg/m^3)		2650								
	Mediana RHP ($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	1.3	0.7	0.8	2.8							

5.4.2. Intrusivo Jurásico (Jig)

Estas rocas de carácter ígneo intrusivo, del tipo granodiorita, algunas con alteración presentan un RHP medido para estas rocas con un promedio de $2,3 \mu W/m^3$ con una desviación estándar de 0,8. En comparación con la mediana mundial de $2,073 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 1,235. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil 75, el cual presenta una mediana de $2,511 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.10: Resumen datos para: Intrusivo Jurásico

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
96	-35.29194	-71.9760917	1.6	0.1	1.9	0.4	9.0	0.5	1.2	4.7	0.8
97	-35.29194	-71.9760917	3.7	0.1	3.7	0.8	15.8	1.7	2.3	4.3	1.0
98	-35.29194	-71.9760917	1.9	0.1	2.3	0.8	10.8	1.7	1.5	4.7	0.8
99	-35.2938988	-71.9756028	1.0	0.1	1.3	0.4	8.9	0.5	1.0	6.8	0.8
100	-35.2938988	-71.9756028	0.7	0.0	0.7	0.2	2.3	0.5	0.4	3.3	1.0

Continúa en la página siguiente

Continuación de la página anterior											
Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
101	-35.2938988	-71.9756028	0.6	0.1	1.2	0.4	5.7	0.5	0.7	4.8	0.5
102	-35.2972594	-71.9631822	2.0	0.1	1.7	0.8	10.3	1.7	1.3	6.1	1.2
103	-35.2972594	-71.9631822	2.2	0.1	2.3	0.8	10.1	1.7	1.5	4.4	1.0
104	-35.2972594	-71.9631822	2.7	0.1	4.3	0.8	17.6	1.7	2.5	4.1	0.6
105	-35.2973968	-71.9682333	2.5	0.1	2.2	0.8	14.3	1.7	1.7	6.5	1.1
106	-35.2972055	-71.9690508	3.2	0.1	3.3	0.8	16.9	1.7	2.3	5.1	1.0
107	-35.2972594	-71.9631822	3.4	0.1	4.0	0.8	17.5	1.7	2.5	4.4	0.9
108	-35.2972594	-71.9631822	3.1	0.1	1.8	0.8	14.6	1.7	1.7	8.1	1.7
109	-35.3041226	-71.9644771	1.8	0.1	1.6	0.4	9.6	0.5	1.2	6.0	1.1
110	-35.3041226	-71.9644771	1.6	0.1	1.3	0.4	9.7	0.5	1.1	7.5	1.2
111	-35.3041226	-71.9644771	1.7	0.1	2.3	0.4	8.5	0.5	1.3	3.7	0.7
562	-35.328065	-72.42961	4.2	0.1	3.8	0.8	16.5	1.7	2.5	4.3	1.1
563	-35.328047	-72.42961	5.5	0.2	3.1	0.9	17.6	1.7	2.5	5.7	1.8
564	-35.328022	-72.429592	4.9	0.1	4.0	0.8	17.6	1.7	2.6	4.4	1.2
565	-35.328103	-72.429608	5.0	0.2	4.2	0.9	17.0	1.7	2.7	4.0	1.2
566	-35.328035	-72.429778	5.2	0.2	3.6	0.9	18.8	1.7	2.7	5.2	1.4
584	-35.588493	-71.91852	4.2	0.1	3.3	0.8	17.9	1.7	2.4	5.4	1.3
585	-35.588422	-71.918555	4.5	0.1	3.4	0.8	18.4	1.7	2.5	5.4	1.3
586	-35.588467	-71.918482	5.4	0.2	5.4	0.9	18.8	1.7	3.1	3.5	1.0
587	-35.588503	-71.918478	4.2	0.1	3.5	0.8	21.2	1.7	2.7	6.1	1.2
589	-35.588522	-71.918512	5.4	0.2	3.8	0.9	29.6	1.7	3.5	7.8	1.4
		Mediana	3.2		3.2		16.2		2.3	4.9	1.1
	Densidad (kg/m^3)		2640								
	Mediana RHP ($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	2.3	0.8	0.4	3.5							

5.4.3. Intrusivo Cretácico (Kiag)

Estas rocas de carácter ígneo intrusivo, del tipo granodiorita, algunas con alteración presentan un RHP medido para estas rocas con una mediana de $1,8 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 0,5. En comparación con la mediana mundial de $2,073 \mu W/m^3$ y una desviación estándar de 1,235. Las rocas en estudio se ubicarían en el percentil 50, el cual presenta una mediana de $1,879 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010).

Tabla 5.11: Resumen datos para: Intrusivo Cretácico

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
148	-35.4169567	-71.6876769	0.4	0.1	4.1	0.8	14.4	1.7	1.9	3.5	0.1
149	-35.4169567	-71.6876769	2.3	0.1	1.6	0.4	5.3	0.5	0.9	3.3	1.4
150	-35.4169567	-71.6876769	1.6	0.1	1.5	0.4	7.2	0.5	1.0	4.8	1.1
311	-35.275482	-71.696887	4.5	0.1	1.8	0.8	13.8	1.7	1.7	7.7	2.5
312	-35.275495	-71.696828	4.5	0.1	2.0	0.8	17.2	1.7	2.0	8.6	2.3
313	-35.27554	-71.696855	4.9	0.1	1.4	0.8	16.3	1.7	1.8	11.6	3.5
314	-35.27545	-71.696865	4.2	0.1	2.3	0.8	14.3	1.7	1.8	6.2	1.8
315	-35.275427	-71.696962	4.1	0.1	2.5	0.8	12.5	1.7	1.8	5.0	1.6
316	-35.281155	-71.700133	4.4	0.1	3.0	0.8	15.7	1.7	2.1	5.2	1.5
317	-35.281015	-71.700103	5.0	0.2	3.2	0.9	16.8	1.7	2.3	5.3	1.6
318	-35.28099	-71.700063	4.3	0.1	2.6	0.8	14.9	1.7	1.9	5.7	1.7
319	-35.281133	-71.700137	4.4	0.1	0.7	0.8	13.9	1.7	1.4	19.9	6.3
320	-35.281192	-71.700057	4.8	0.1	2.0	0.8	16.8	1.7	2.0	8.4	2.4
321	-35.281138	-71.700212	4.7	0.1	4.6	0.8	16.5	1.7	2.6	3.6	1.0
374	-35.56799	-71.697667	3.5	0.1	1.0	0.8	10.6	1.7	1.2	10.6	3.5
375	-35.56804	-71.697703	3.2	0.1	1.8	0.8	10.5	1.7	1.4	5.8	1.8
376	-35.567912	-71.697703	3.8	0.1	1.8	0.8	11.7	1.7	1.5	6.5	2.1
377	-35.567912	-71.697738	3.4	0.1	1.3	0.8	11.4	1.7	1.3	8.8	2.6
378	-35.567933	-71.697737	2.9	0.1	2.9	0.4	9.2	0.5	1.5	3.2	1.0

Continúa en la página siguiente

Id	Latitud	Longitud	K(%)	± K	U(ppm)	± U	Th(ppm)	± Th	RHP ($\mu W/m^3$)	Th/U	($\times 10^4$)
379	-35.567892	-71.697613	3.7	0.1	3.8	0.8	11.1	1.7	1.9	2.9	1.0
380	-35.567917	-71.697643	3.7	0.1	2.2	0.8	10.7	1.7	1.5	4.9	1.7
381	-35.567882	-71.69755	4.0	0.1	1.5	0.8	10.9	1.7	1.4	7.3	2.7
382	-35.567878	-71.697547	3.2	0.1	1.5	0.4	9.6	0.5	1.2	6.4	2.1
425	-35.473255	-71.632918	3.6	0.1	2.0	0.8	11.7	1.7	1.5	5.9	1.8
426	-35.473307	-71.632902	3.8	0.1	1.6	0.8	13.3	1.7	1.6	8.3	2.4
427	-35.473313	-71.632905	4.4	0.1	2.9	0.8	13.0	1.7	1.9	4.5	1.5
428	-35.4734	-71.632805	3.6	0.1	1.5	0.8	14.6	1.7	1.6	9.7	2.4
429	-35.473517	-71.632905	3.5	0.1	1.6	0.8	15.3	1.7	1.7	9.6	2.2
623	-35.516268	-71.702217	5.4	0.3	4.6	0.3	18.9	1.7	2.8	4.1	1.2
624	-35.51622	-71.70223	5.0	0.3	4.1	0.3	18.6	1.7	2.6	4.5	1.2
625	-35.516143	-71.702223	5.4	0.3	2.4	0.3	21.2	1.7	2.4	8.8	2.3
626	-35.516152	-71.702183	6.0	0.3	6.2	0.3	19.6	1.7	3.3	3.2	1.0
627	-35.516283	-71.7023	5.5	0.4	6.3	0.3	19.5	1.7	3.2	3.1	0.9
628	-35.516302	-71.702427	6.2	0.4	7.0	0.3	22.1	1.7	3.6	3.2	0.9
629	-35.547677	-71.737983	3.8	0.2	2.7	0.3	11.3	1.7	1.7	4.2	1.4
630	-35.547633	-71.737968	3.7	0.2	3.4	0.3	12.7	1.7	1.9	3.7	1.1
631	-35.547717	-71.737822	4.0	0.2	1.8	0.3	13.8	1.7	1.7	7.7	2.2
632	-35.547667	-71.7378	3.8	0.2	2.2	0.3	14.7	1.7	1.8	6.7	1.7
633	-35.540542	-71.758662	3.2	0.2	3.2	0.3	11.5	1.7	1.8	3.6	1.0
634	-35.540655	-71.758543	3.8	0.2	2.7	0.3	11.1	1.7	1.7	4.1	1.4
635	-35.540708	-71.758502	4.1	0.2	2.4	0.3	14.9	1.7	1.9	6.2	1.7
636	-35.540672	-71.758253	4.2	0.2	2.7	0.3	11.8	1.7	1.8	4.4	1.6
637	-35.594632	-71.769895	3.8	0.2	3.1	0.3	12.2	1.7	1.8	3.9	1.2
638	-35.516115	-71.775757	4.3	0.2	3.9	0.3	12.0	1.7	2.1	3.1	1.1
639	-35.516052	-71.775755	3.6	0.2	2.8	0.3	12.7	1.7	1.8	4.5	1.3
640	-35.516128	-71.775683	4.5	0.2	3.8	0.3	14.6	1.7	2.2	3.8	1.2
641	-35.51616	-71.775682	4.2	0.2	3.0	0.3	14.5	1.7	2.0	4.8	1.4
642	-35.509707	-71.774382	3.5	0.2	1.9	0.3	12.7	1.7	1.6	6.7	1.8
643	-35.50969	-71.77437	3.9	0.2	2.2	0.3	10.7	1.7	1.5	4.9	1.8
644	-35.509615	-71.774225	2.7	0.2	1.5	0.3	10.5	1.7	1.3	7.0	1.8
645	-35.509638	-71.774197	2.8	0.2	1.8	0.3	9.1	0.6	1.3	5.1	1.6
646	-35.509635	-71.774262	3.1	0.2	1.7	0.3	10.6	1.7	1.4	6.2	1.8
662	-35.421538	-71.622055	3.7	0.2	2.0	0.3	17.1	1.7	1.9	8.6	1.9
663	-35.421532	-71.622012	3.1	0.2	3.3	0.3	10.4	1.7	1.7	3.2	0.9
664	-35.421592	-71.622005	3.6	0.2	3.9	0.3	11.8	1.7	2.0	3.0	0.9
665	-35.42145	-71.622055	3.8	0.2	2.2	0.3	10.8	1.7	1.5	4.9	1.7
666	-35.4215	-71.622025	3.3	0.2	3.5	0.3	9.2	0.6	1.7	2.6	0.9
667	-35.549253	-71.69712	3.3	0.2	2.1	0.3	9.6	0.6	1.4	4.6	1.6
668	-35.54924	-71.697162	3.4	0.2	1.8	0.3	10.0	1.7	1.4	5.6	1.9
669	-35.549272	-71.697183	3.3	0.2	1.9	0.3	10.1	1.7	1.4	5.3	1.7
670	-35.54918	-71.697197	3.0	0.2	1.1	0.3	8.5	0.6	1.1	7.7	2.7
671	-35.549173	-71.697052	3.0	0.2	1.2	0.3	11.6	1.7	1.3	9.7	2.5
672	-35.549155	-71.697005	3.5	0.2	1.9	0.3	9.7	0.6	1.4	5.1	1.8
673	-35.54922	-71.697118	2.1	0.2	1.3	0.3	5.6	0.6	0.9	4.3	1.6
749	-35.420458	-71.697102	4.1	0.2	3.3	0.3	18.4	1.7	2.3	5.6	1.2
750	-35.4204	-71.697093	4.1	0.2	3.6	0.3	15.9	1.7	2.2	4.4	1.1
751	-35.42044	-71.697097	4.1	0.2	4.8	0.3	17.6	1.7	2.6	3.7	0.9
752	-35.47438	-71.632968	4.8	0.2	2.2	0.3	15.5	1.7	1.9	7.0	2.2
753	-35.47425	-71.632765	4.5	0.2	3.6	0.3	13.5	1.7	2.1	3.8	1.3
754	-35.474372	-71.632985	4.7	0.2	2.5	0.3	16.4	1.7	2.1	6.6	1.9
		Mediana	3.8		2.3		12.7		1.8	5.1	1.6
	Densidad (kg/m^3)		2500								
	Mediana RHP ($\mu W/m^3$)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo							
	1.8	0.5	0.9	3.6							

5.5. Distribución de concentraciones de elementos productores de calor radiogénico (RHPe)

A continuación se presentan los mapas que resumen la ubicación de las muestras, y la concentración de los distintos elementos radiogénicos presentados en las tablas anteriores.

En la figura 5.1, se aprecian las concentraciones de U, que varían desde los 0,00 ppm hasta los 7,2 ppm, las mayores concentraciones se agrupan en torno al Basamento Metamórfico, las Ignimbritas de Cerro Caupolicán y los Estratos de Litú. Las formaciones que presentan menor concentración de U, son la Formación Culenar y la Formación Abanico.

En la figura 5.2, se aprecian las concentraciones de Th, que varían desde los 1,00 ppm hasta los 34,1, las mayores concentraciones se agrupan en torno al Basamento Metamórfico, las Ignimbritas de Cerro Caupolicán y los Estratos de Litú, además de los intrusivos Jurásico y Cretácico. Las formaciones que presentan menor concentración de U, son la Formación Culenar y la Formación Abanico.

En la figura 5.3, se aprecian las concentraciones de K, que varían desde los 0,1 ppm hasta los 10,3 ppm, las mayores concentraciones se agrupan en torno al Basamento Metamórfico, la formación Altos de Hualmapu, las Ignimbritas de Cerro Caupolicán y los Estratos de Litú, además del intrusivo Cretácico. Las formaciones que presentan menor concentración de U, son la Formación Culenar y la Formación Abanico.

Una vez obtenido las concentraciones de los RHPe, es posible calcular la producción de calor de las unidades geológicas mediante la ecuación 1.1. La producción de calor de cada formación queda reflejado en la figura 5.4. El promedio terrestre es de $1,58 \mu W/m^3$ (Vilà et al., 2010), el RHP varía desde los $0,4 \mu W/m^3$ hasta los $2,8 \mu W/m^3$ las formaciones con mayor producción de calor radiogénico son las Ignimbritas de Cerro Caupolicán, el Basamento Metamórfico, y la formación Altos de Hualmapu, junto con el intrusivo Jurásico, las formaciones con menor producción de calor radiogénico son la formación Abanico y los Estratos del Laurel.

Concentración de Uranio

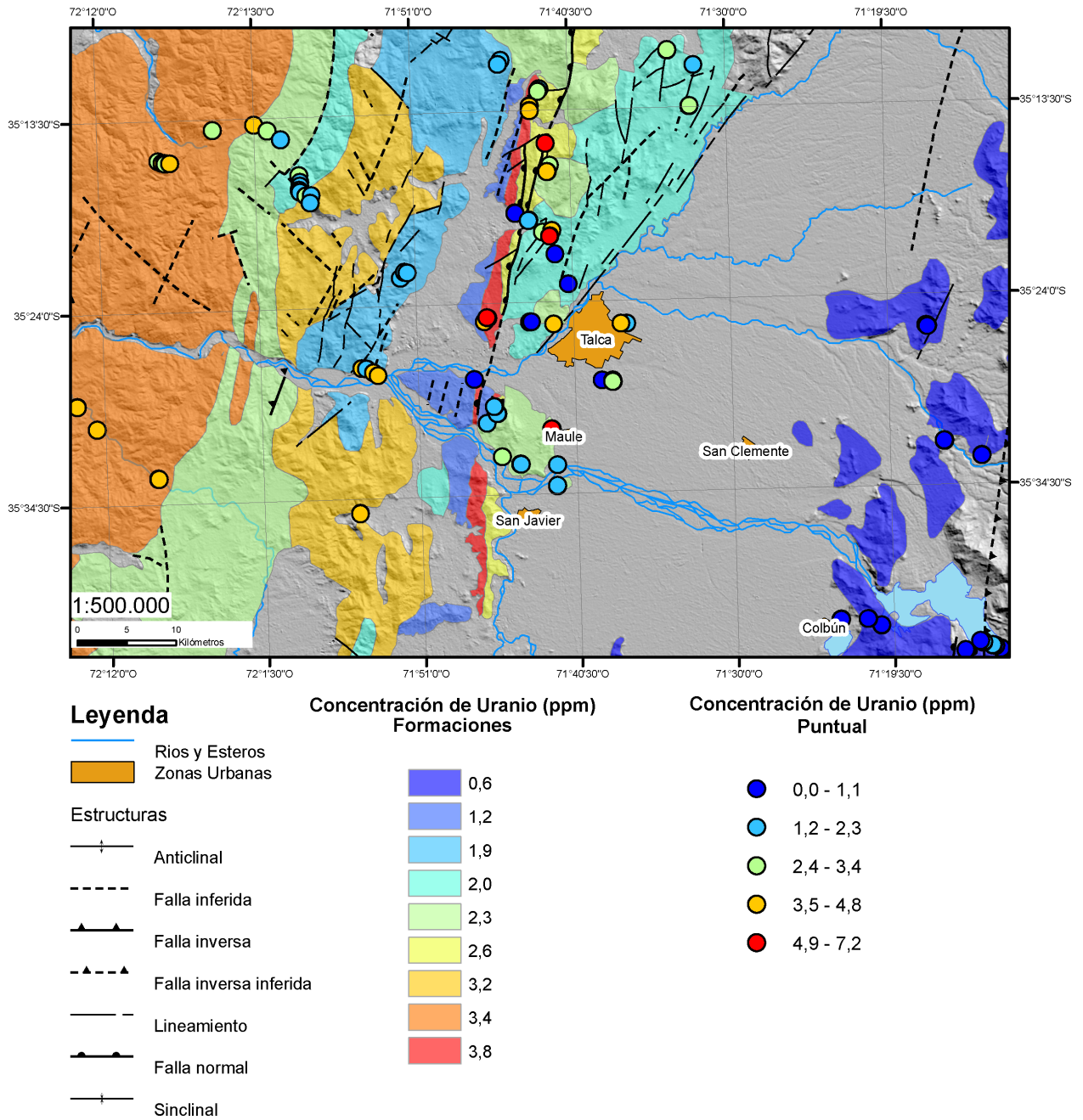


Figura 5.1: Concentración de uranio en cada punto de medición (puntos de color). Las áreas coloreadas corresponden a la mediana de las concentraciones calculada por formación.

Concentración de Torio

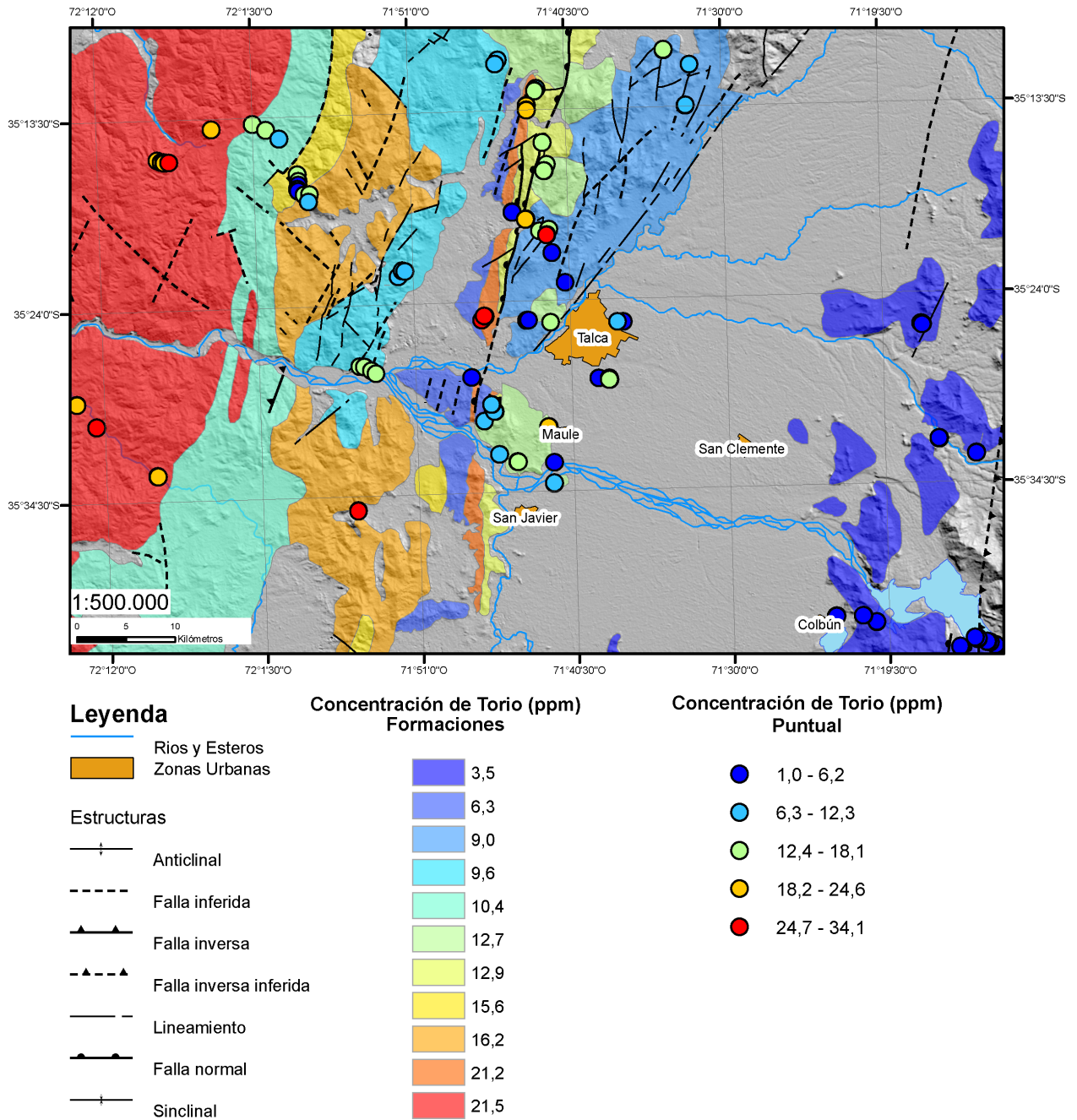


Figura 5.2: Concentración de torio en cada punto de medición (puntos de color). Las áreas coloreadas corresponden a la mediana de las concentraciones calculada por formación.

Concentración de Potasio

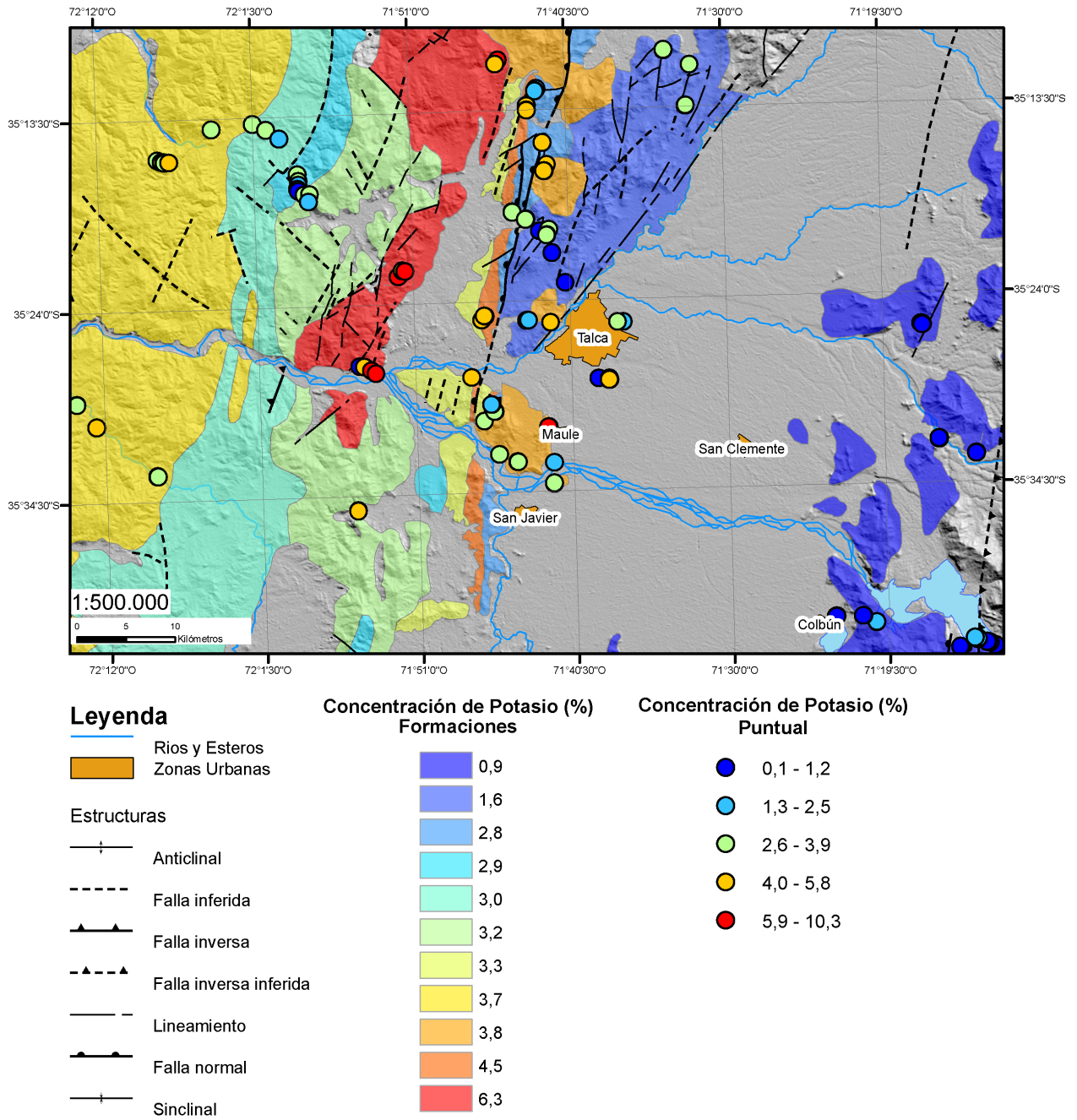


Figura 5.3: Concentración de potasio en cada punto de medición (puntos de color). Las áreas coloreadas corresponden a la mediana de las concentraciones calculada por formación.

Producción de Calor Radiogénico

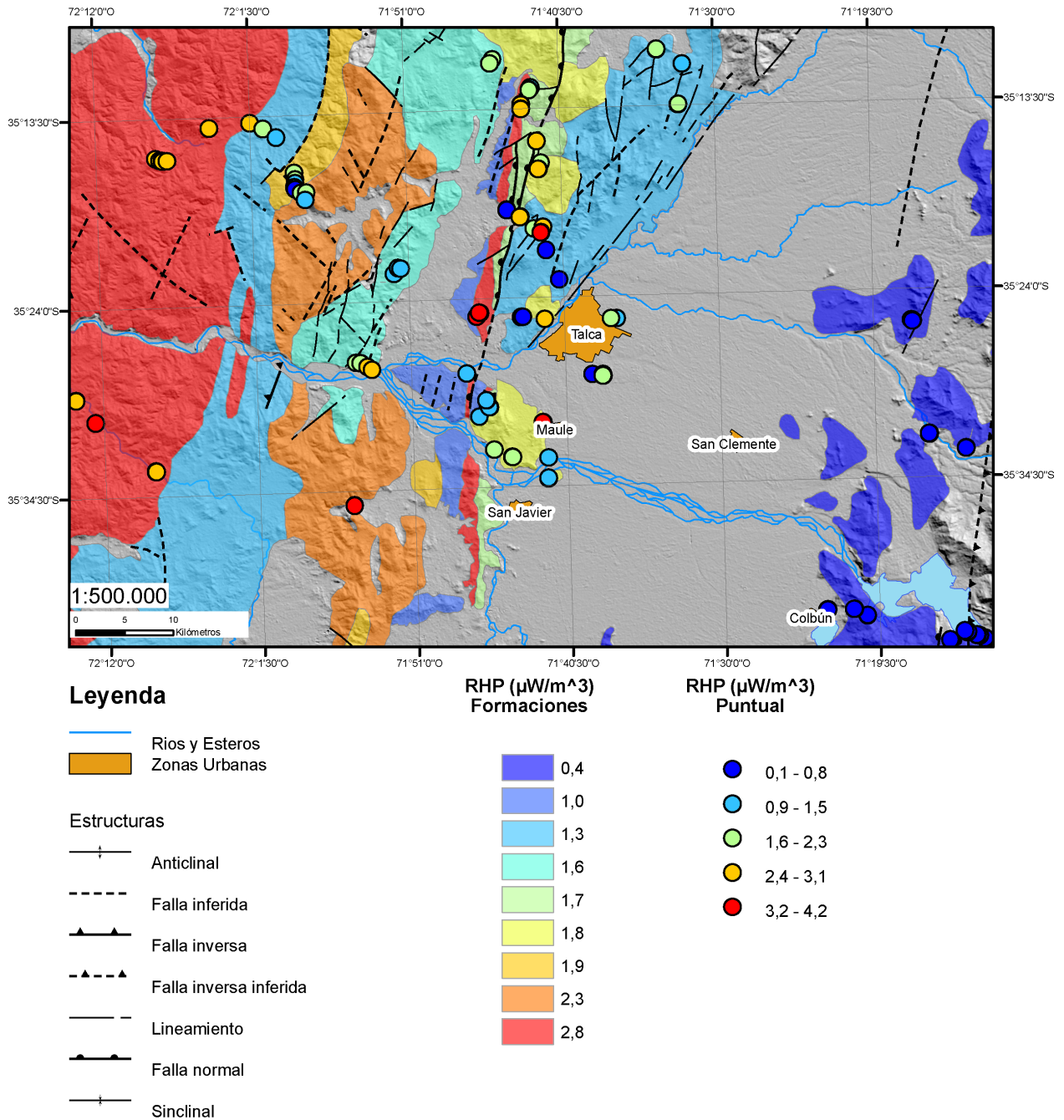


Figura 5.4: Producción de calor radiogénico (RHP) en cada punto de medición (puntos de color). Las áreas coloreadas corresponden a la mediana del RHP calculada por formación.

5.6. Razones Th/U y K/U y su distribución espacial

El elemento radiogénico mas importante en la producción de calor es el U, siendo así, es necesario entender como se relaciona con los dos otros elementos, en cuanto a su concentración, para diferenciar de manera mas acotada la fuente de origen del calor. En la imagen 5.5 se observa que la relación Th/U va desde 4,3 a 7,0, recordando que la mediana mundial está entorno a 4,0. Las rocas que presentan menor enriquecimiento en Th son las pertenecientes a la formación El Culenar y las de mayor enriquecimiento en Th son las del Basamento Metamórfico, Triásico-Jurásico y la formación Abanico además del intrusivo Jurásico. En la figura 5.6 se establece la razón $K/U \cdot 10^4$ en la cual el promedio mundial esta entorno a 1,00, en la zona los valores varian desde 1,0 hasta 3,2, las formaciones con menor razón, son las Ignimbritas de Cerro Caupolican, las rocas del Triásico y las de la formación El Culenar.

Razón Th/U

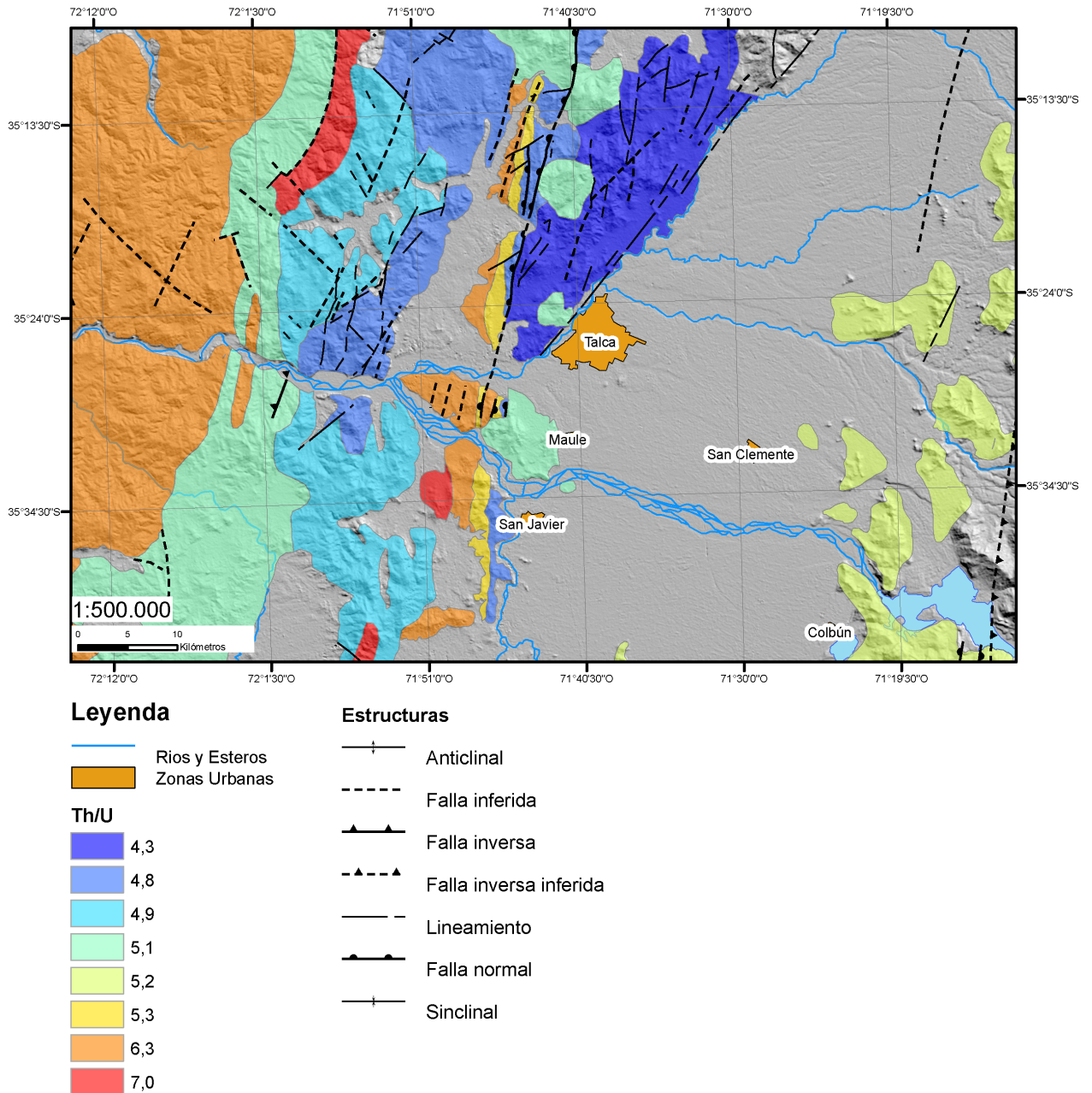


Figura 5.5: Relación Th/U para cada formación, se observa que en promedio todas las rocas están empobrecidas en U, $Th/U = 4$ es la media mundial

Razón K/U

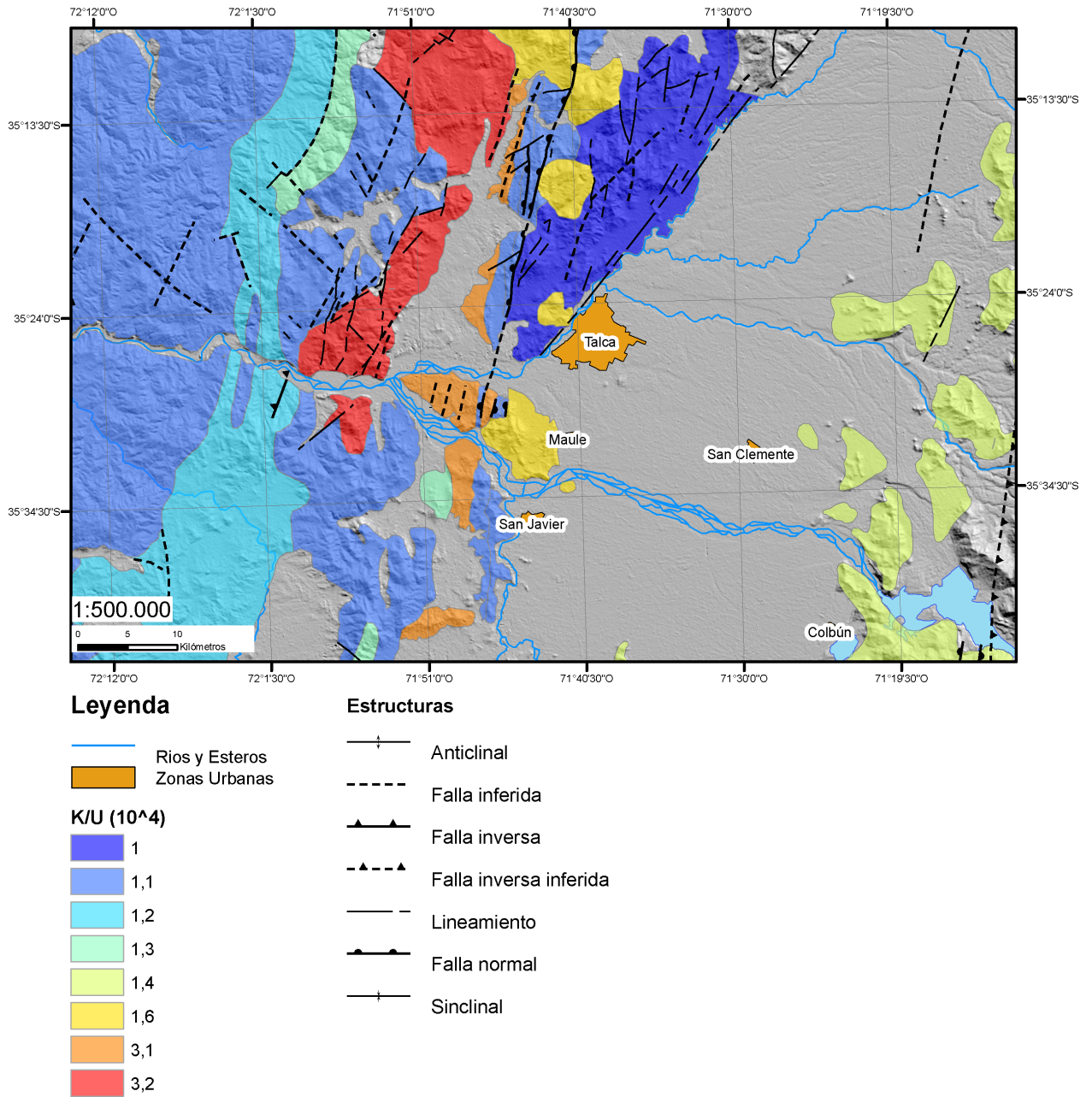


Figura 5.6: Relación K/U para cada formación, se observa que en promedio todas las rocas están empobrecidas en U $K/U * 10^4$ es la media mundial

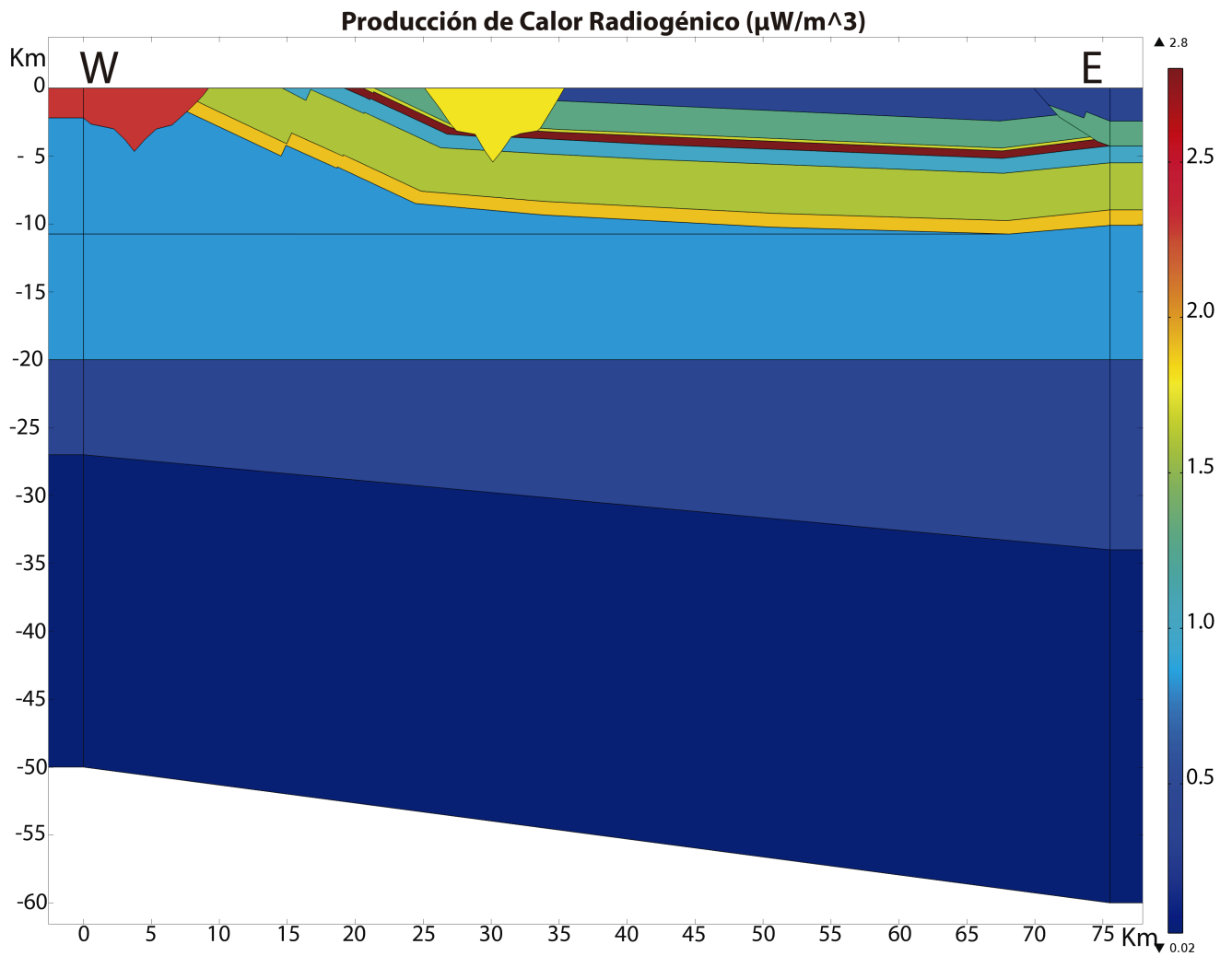


Figura 5.7: Producción de calor radiogénico en perfil por parte de cada unidad geológica.

Capítulo 6

Modelamiento del flujo de calor mediante elementos finitos

6.1. Input de datos

Geometría: La geometría utilizada corresponde al perfil estructural de la figura 2.1, se eliminó la topografía pues lo abrupta de esta produce distorsiones en la modelación, la influencia de esta es mínima, pues mayormente el promedio sobre el nivel del mar no supera los 300 metros.

Materiales: En la sección materiales se introducen las unidades geológicas y sus propiedades físicas de conductividad termal (k), capacidad calorífica a presión constante (C_p) y densidad (ρ) ver tabla 6.1

Tabla 6.1: Tabla resumen de propiedades físicas de las rocas. Donde RHP es la producción de calor radiogénico, ρ es la densidad promedio de la formación, C_p es la capacidad calorífica y k es la conductividad térmica.

Unidad Geologica	$\rho(kg/m^3)$	$C_p(J/(kg*K))$	$k(W/(m * K))(***)$
Fm. Abanico	2540	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Fm. El Culenar	2520	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Estratos del Litu	2570	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Fm. Cerro Caupolican	2540	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Estratos de El Laure	2550	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Fm. Hualmapu	2590	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Triasico	2530	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Intrusivo Cretacico	2500	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Intrusivo Jurasico	2640	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Corteza Superior	2700	800(*)	$2,9 * (1/(1 + 0,0015 * T))$
Corteza Media	2700	1000(*)	$2,8 * (1/(1 + 0,0001 * T))$
Corteza Inferior	3100	$1617,4 - 0,0210 * T - 14047 * T^(-0,5)**)$	$2,5 * (1/(1 + 0,0001 * T))$
Manto Litosferico	3100	$1828,8 - 0,0103 * T - 18285 * T^(-0,5)(****)$	$3 * (1/(1 + 0,0001 * T)) + 3 * 10^{-10} * (T + 273,15)^3$

(*)(Robie, 1995), (**)(Vosteen y Schellschmidt, 2003), (***)(He et al., 2009), (****)(Merriman et al., 2013)

Dentro de la geometría de la corteza superior existe un sector sin información en detalle, la cual corresponde al sector poniente de Pencahue, que ha sido denominada simple-

mente como Corteza Superior (ver figura 4.7), al no conocer su configuración precisa, se ha optado por darle una configuración moderada, la cual consiste en una conductividad termal propia de la corteza superior, pero la densidad y producción de calor propias de una corteza media, esto debido a que en la zona de estudio se aprecia que las rocas que afloran en el sector oeste, presentan metamorfismo de grado medio (facies metamórficas de esquistos verdes) consistentes a rocas de la corteza media.

Transferencia de calor en sólidos (*ht*): En esta sección se establecen las condiciones del sistema.

- **Transferencia de calor en sólidos:** En el sistema se utilizara la siguiente ecuación para transferencia de calor en régimen estacionario:

$$\rho C_p \vec{u} * \nabla T = \nabla * (k \nabla T) + Q \quad (6.1)$$

Donde:

ρ : Densidad [kg/m^3]

\vec{u} : Vector

C_p : Calor específico a presión constante [$J/(kg * K)$]

k : Conductividad térmica

Q : Fuente de calor Se utilizara el sistema de coordenadas global, y los parámetros k, ρ, C_p serán los propios de cada material.

- **Aislamiento térmico:** El sistema se haya aislado en sus bordes este y oeste (figura 6.5), para ellos se utilizara la siguiente ecuación para el aislamiento térmico en régimen estacionario (se obliga a que el flujo de calor sea 0 en los bordes):

$$-n * (-k \nabla T) = 0 \quad (6.2)$$

Donde:

n : Vector normal de la frontera

T : Temperatura absoluta [K]

k . Conductividad térmica

- **Valores iniciales:** Para todo el sistema se consideró una temperatura inicial de $293.15K$
- **Temperatura superficie:** Se utilizara la temperatura media anual de $286.15[K]$, ver figura 6.3
- **Temperatura base manto litosférico:** Para la base del manto litosférico se estima una temperatura aproximada de $1200^\circ C$, en esta modelación se utilizara una temperatura variable entre $940^\circ C$ y $1070^\circ C$ debido a los efectos de la subducción (Faccenda et al., 2008) (Hall, 2012) siguiendo la siguiente ecuación $560,15 - y * 0,0132415$ con y siendo la profundidad.

- **Producción de calor:** Se deben introducir las producciones de calor de las unidades geológicas W/m^3 . La producción de calor es el termino Q en la ecuación 6.1. Los datos utilizados fueron:

Tabla 6.2: RHP Resumen

Unidad	W/m^3
Manto Litosferico	0.00000002
Corteza Inferior	0.00000037
Corteza Media	0.00000083
Corteza Superior	0.00000083
Intrusivo Jurásico	0.00000230
Intrusivo Cretácico	0.00000180
Triásico-Jurásico	0.00000190
Fm. Altos de Hualmapu	0.00000160
Fm. Estratos de El Laurel	0.00000100
Ignimbritas de Cerro Caupolican	0.00000280
Estratos de Litú	0.00000170
Estratos de El Culenar	0.00000130
Fm. Abanico	0.00000040

6.2. Descripción de la malla

La opción que se utilizó para crear la malla, fue controlada por la física (modo automático) de tamaño extremadamente fino, con elemento de tamaño máximo de 955 m y un mínimo de 1,91 m, la tasa de crecimiento máximo del elemento es de 1,1, con una resolución de curvatura de 0,2 y una resolución de regiones estrechas de 1 como se aprecia en la figura 6.1.

Como la distribución y tamaño de la malla afecta en parte a la modelación, es necesario controlar la calidad de esta, para identificar posibles distorsiones que pueda generar en el modelo. En la figura 6.2 puede observarse de manera gráfica la calidad de los elementos de la malla, 1 cuando el elemento es totalmente simétrico y 0 cuando es totalmente asimétrico. En la malla existen 31.059 elementos triangulares con una calidad promedio de 0,97 y un mínimo de 0,044. El área que cubre la malla es de 5.254 km^2 con una tasa de crecimiento promedio de 1.179.

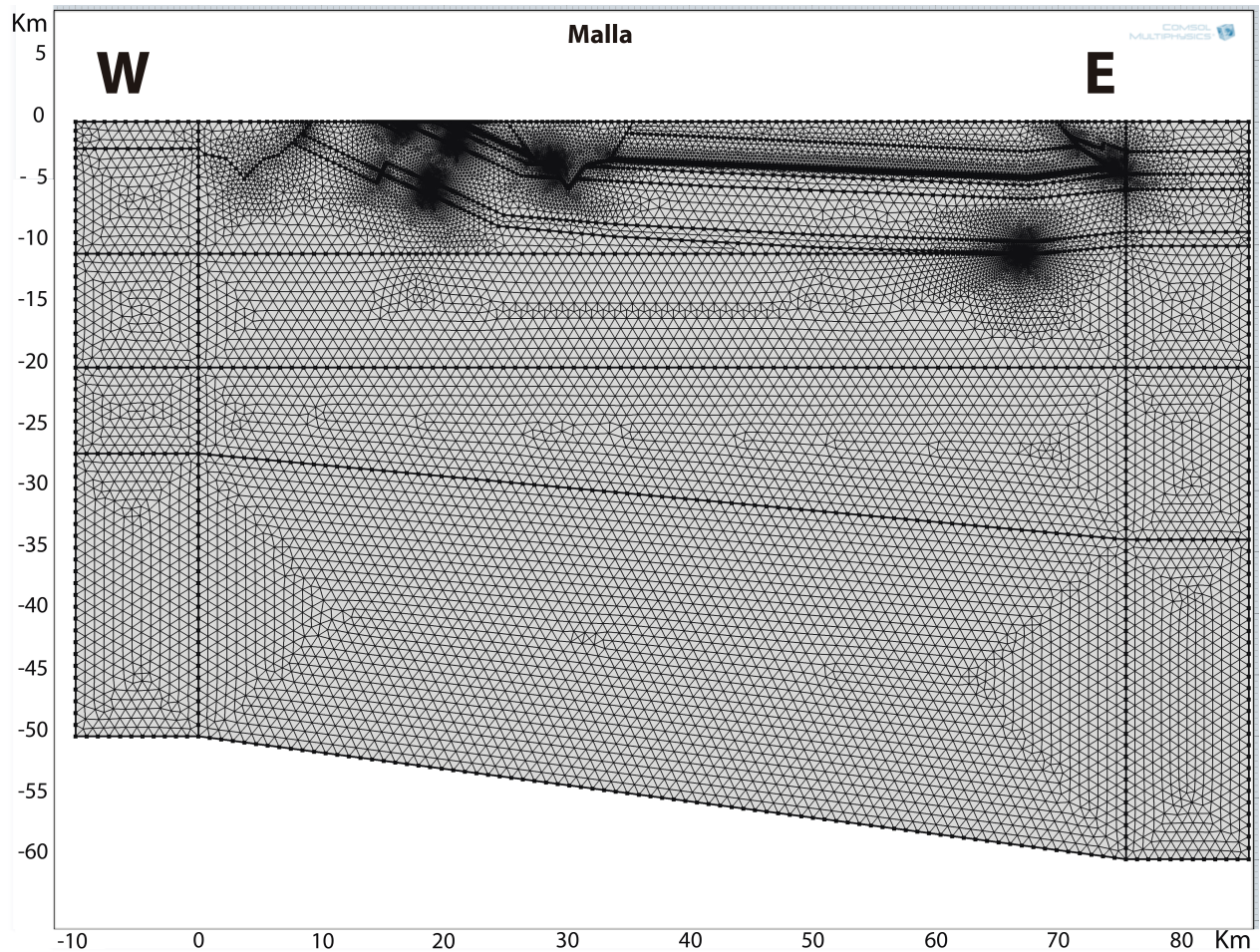


Figura 6.1: Malla del perfil de roca utilizado, para la modelación de transferencia de calor en sólidos, mediante elementos finitos.

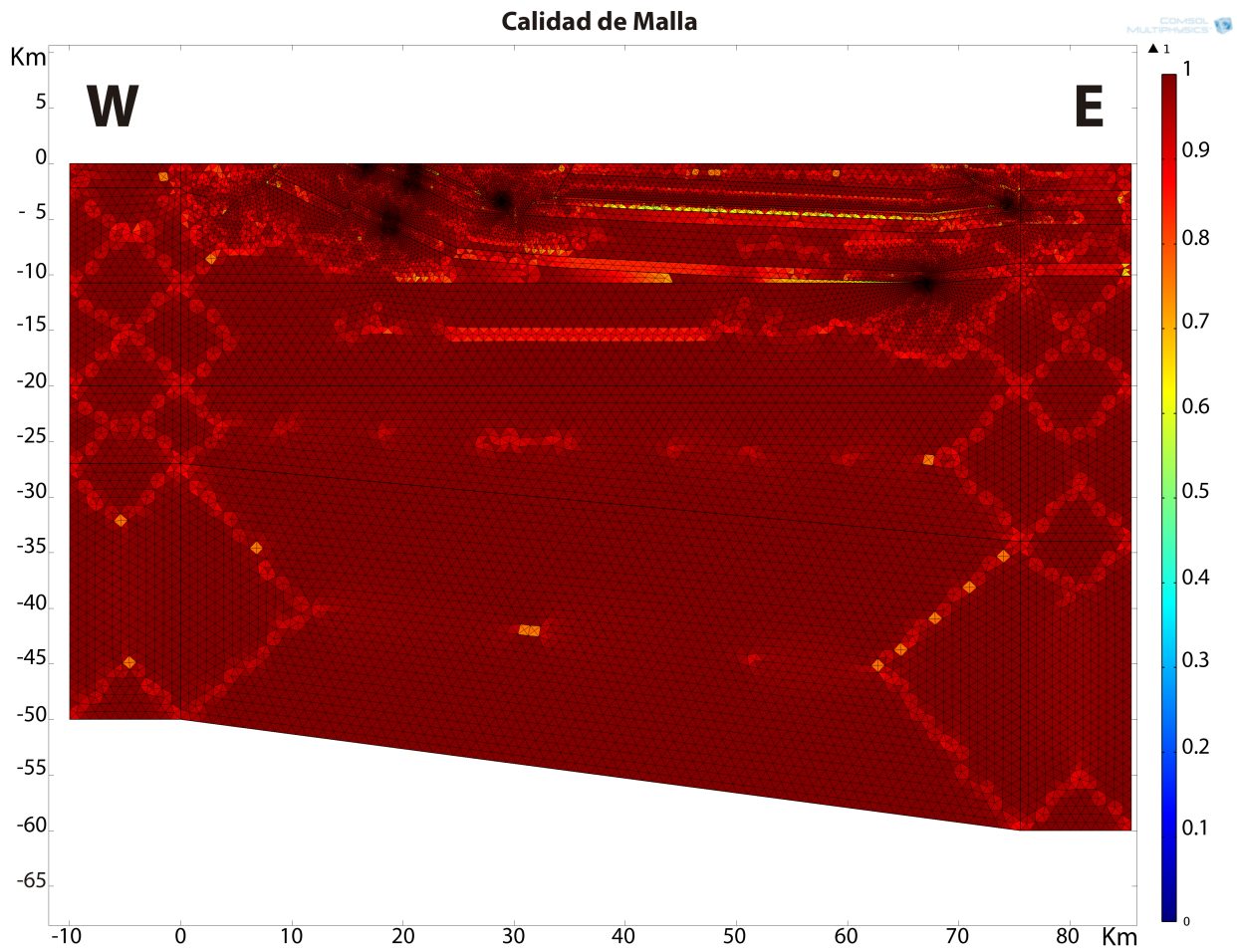


Figura 6.2: Calidad de los elementos finitos utilizados en la modelación de la transferencia de calor a través de la litósfera bajo la cuenca de Talca, 1 como máxima simetría y 0 como mínima.

6.3. Condiciones de borde

EL modelo al ser un sistema cerrado está compuesto por cuatro bordes: superficie, base y límites este y oeste. Los cuales deben ser definidos en cuanto a su comportamiento termal. El borde superior (superficie) e inferior (base manto litosférico) responden a la necesidad de tener condiciones de bordes termales definidos para que las soluciones de ecuaciones diferenciales de primer orden alcancen una solución, siguiendo la condición de frontera de Dirichlet (Cheng y Cheng, 2005). Para la superficie se estimó una temperatura de 13°C (ver figura 6.3) por ser la media anual a nivel del suelo y una temperatura variable en el límite Litósfera-Astenósfera de entre 940°C y 1.070°C (ver figura 6.4). Para los bordes se consideran que son aislados, por lo tanto no interfieren con el modelo, dejando libre a la modelación para poder modificar la temperatura en esos puntos.

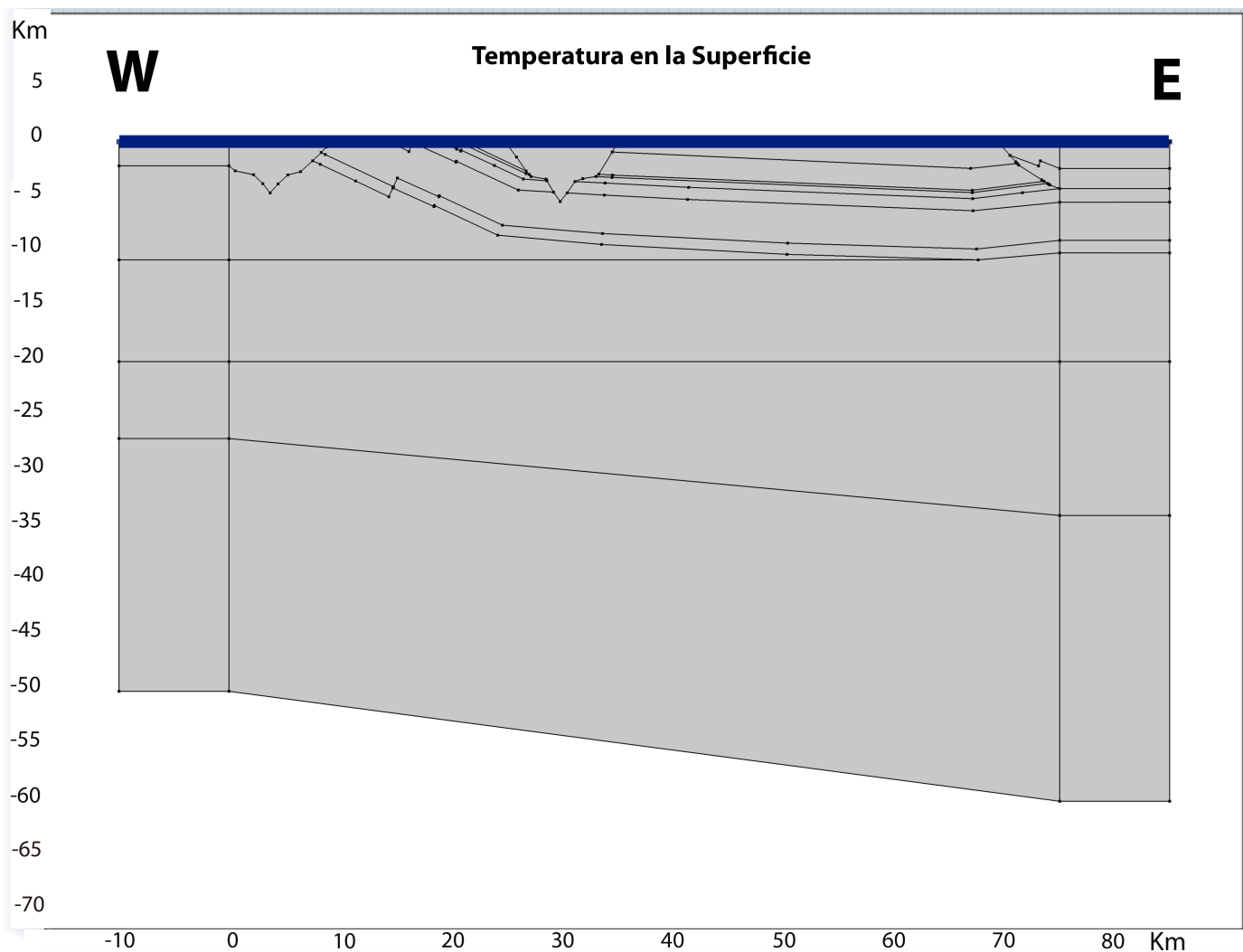


Figura 6.3: En azul temperatura en la superficie, corresponde a la media anual de 13°C

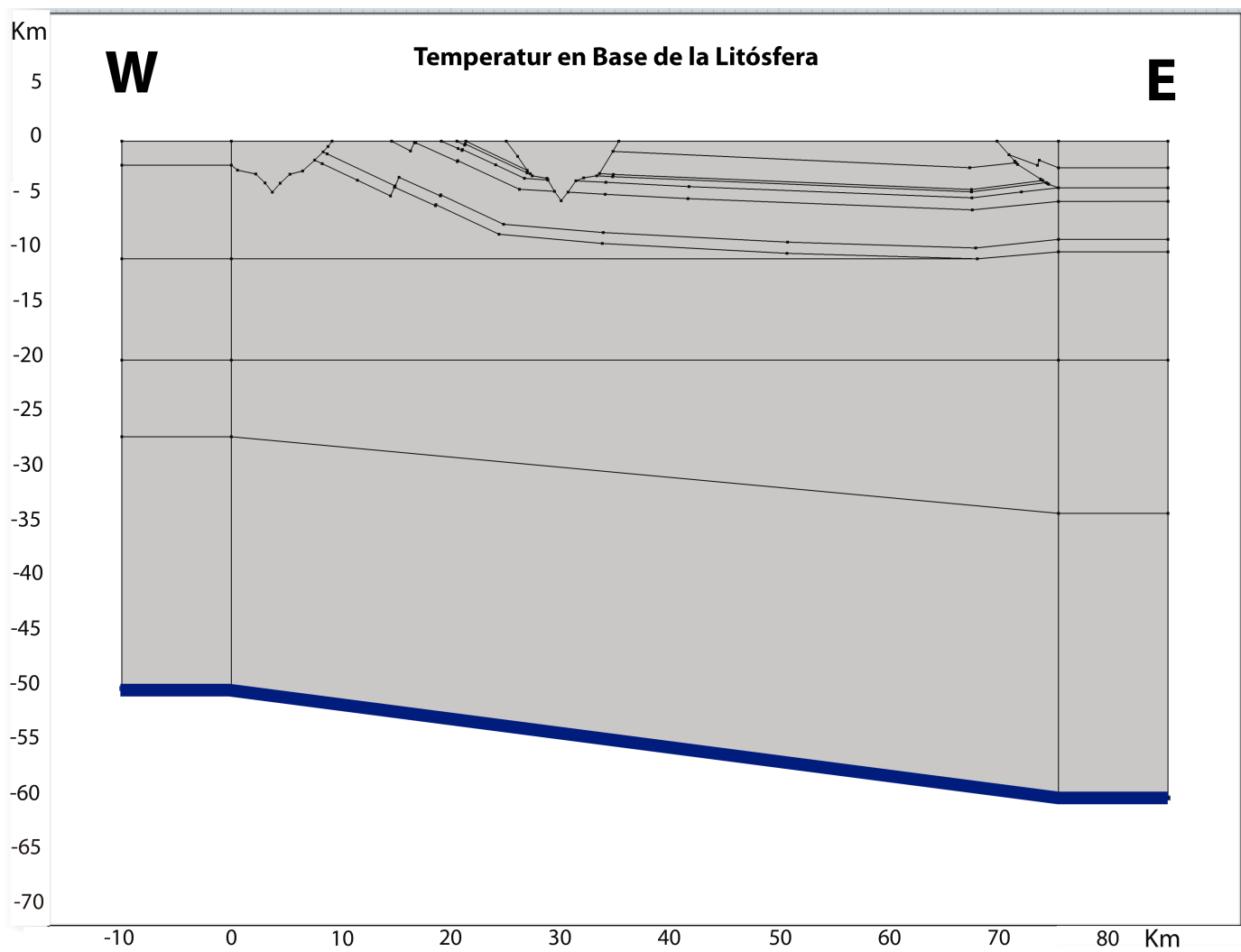


Figura 6.4: En azul, temperatura en la base de la litósfera, sigue la siguiente ecuación $560,15 - y * 0,013$, con temperaturas entre $940^{\circ}C$ y $1.070^{\circ}C$.

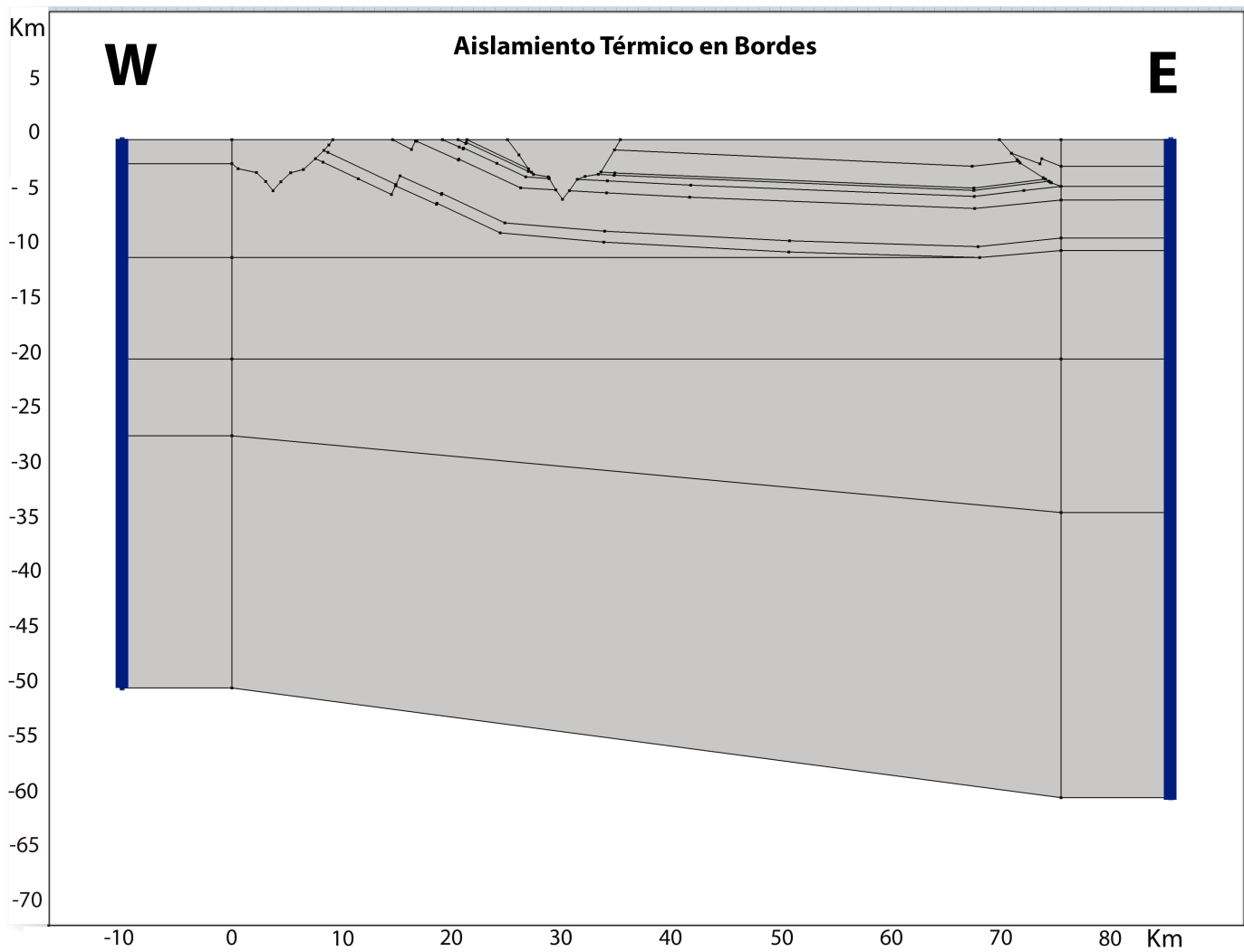


Figura 6.5: En azul, aislamiento térmico en los bordes del sistema, esto quiere decir flujo de calor igual a 0 en el componente x.

6.4. Resultado de modelo de flujo de calor

La modelación entrega un valor para el flujo de calor en superficie que varía entre $62 - 65 \text{ mW/m}^2$ como se aprecia en la figura 6.6 en ella se observa el comportamiento en perfil de la variación del flujo de calor con la profundidad. Con un flujo aproximado para el manto litosférico y corteza inferior de entre $35 - 45 \text{ mW/m}^2$ se obtiene un flujo para la corteza media de entre $45 - 50 \text{ mW/m}^2$ y para la corteza superior de entre $50 - 65 \text{ mW/m}^2$. Dentro de la modelación es posible disgregar los flujos de calor en tres: en verde en la figura 7.3 de 44 mW/m^2 representa al flujo resultante de la diferencia de temperatura entre la base de la litosfera y la superficie sin considerar el aporte del RHP de las rocas. En rojo representa al flujo de calor producido por la diferencia de temperatura entre la base de la litósfera y la superficie, además considera la producción de calor del manto litosférico, la corteza inferior y media resultando en un HF de 51 mW/m^2 . En azul esta el HF que corresponde al producido por la diferencia de temperatura y la producción de calor de toda la litósfera, resultando un flujo de entre $62 - 65 \text{ mW/m}^2$. En cuanto a las temperaturas resultantes del modelo varían desde los 13°C en la superficie hasta los 1070°C en la base de la Litósfera (ver figura 6.7). El gradiente producido es de $16^\circ\text{C}/\text{km}$ para el manto litosférico, de $18^\circ\text{C}/\text{km}$ para la corteza inferior y media. Finalmente para la corteza superior el gradiente es de $24^\circ\text{C}/\text{km}$.

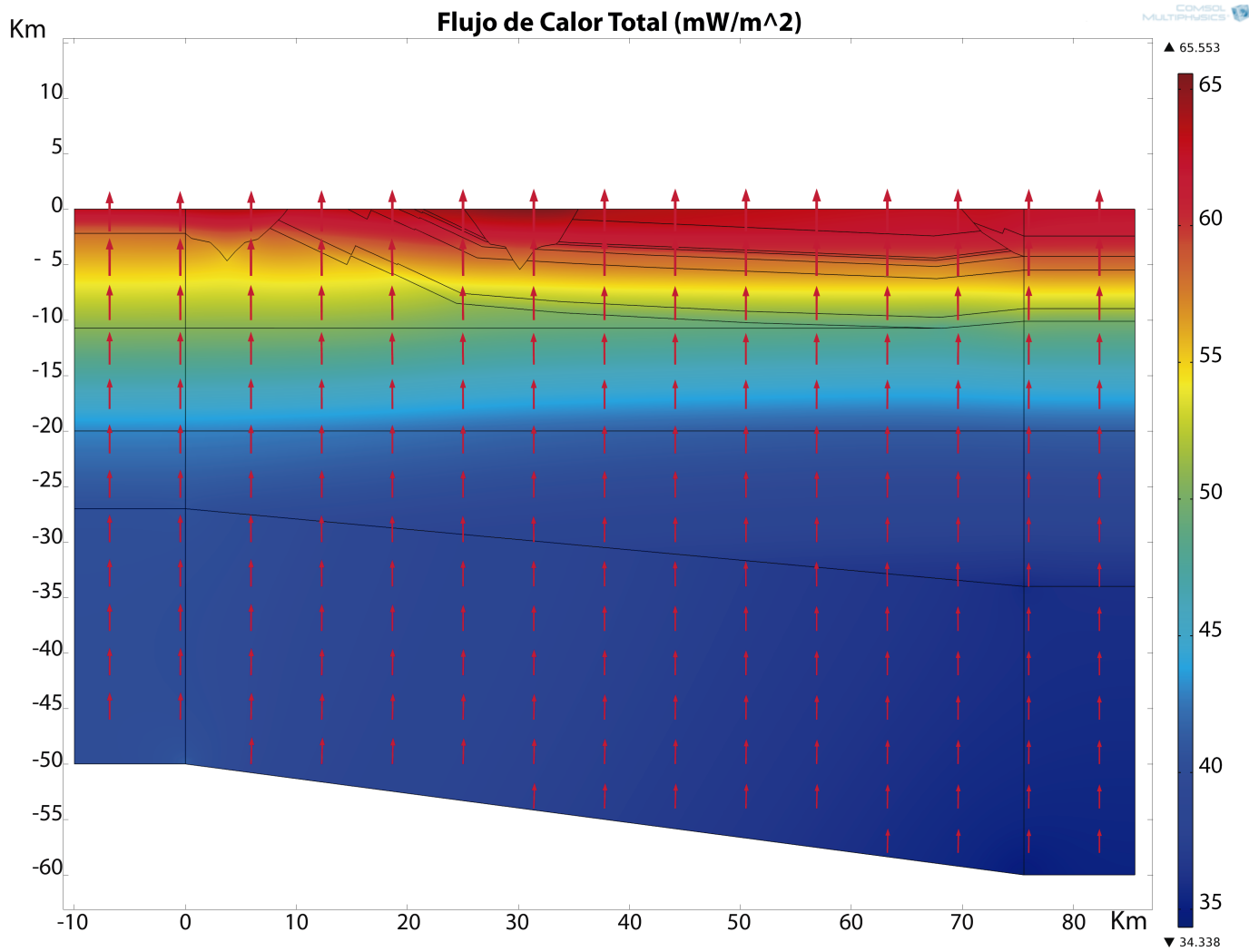


Figura 6.6: Perfil de flujo de calor en la cuenca de Talca, con un máximo de $65,5 \text{ mW/m}^2$.

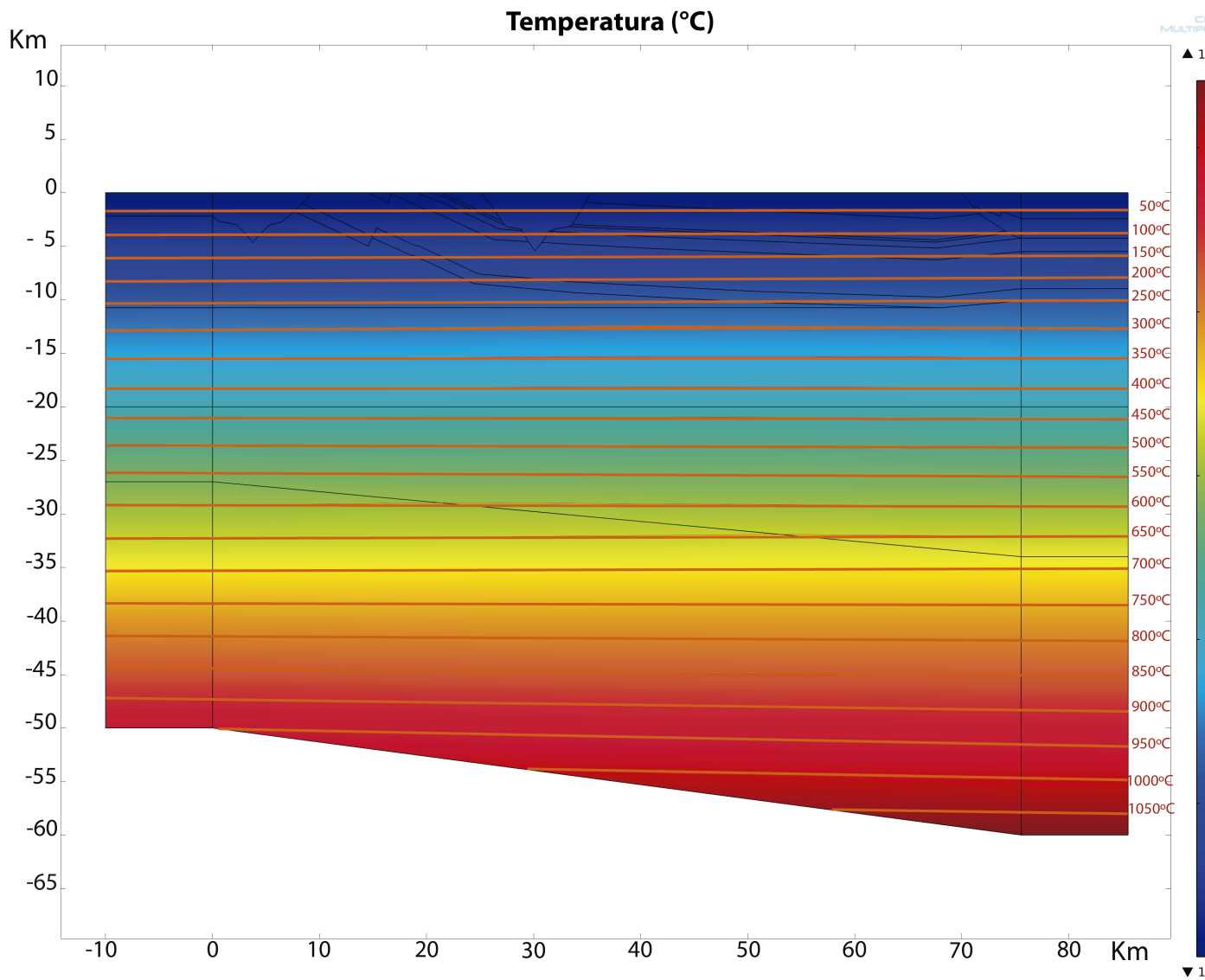


Figura 6.7: Isolneas de temperatura, con condiciones de borde de $13^{\circ}C$ en la superficie y en el borde inferior se utilizó la siguiente ecuación $560,15 - y * 0,0132415$ donde y es la profundidad, esto debido a que la temperatura no es la misma en todo el borde inferior.

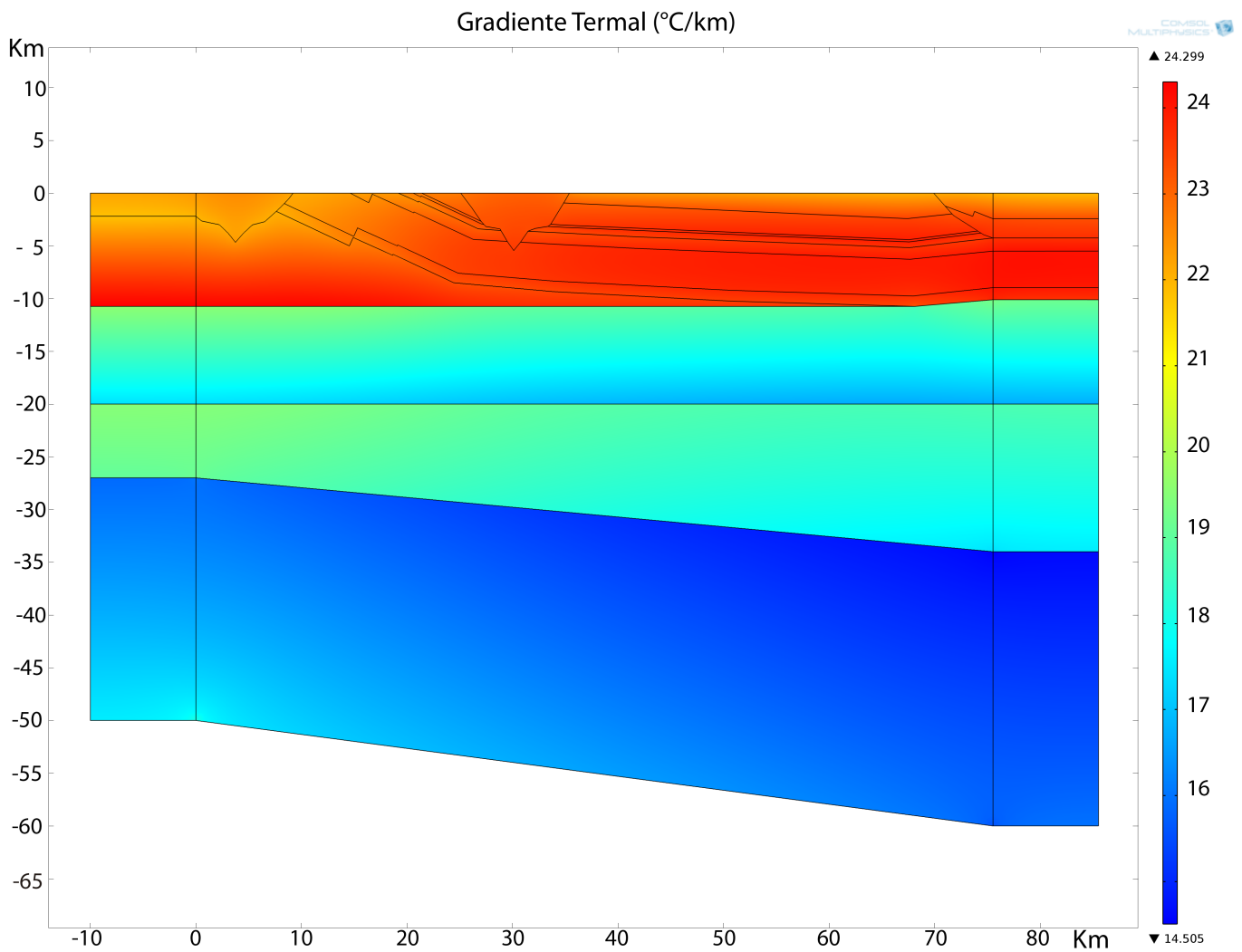


Figura 6.8: Gradiente de temperatura resultante de la modelación, para la corteza superior se estima un gradiente de $23^{\circ}\text{C}/\text{km}$, para la corteza media e inferior, un gradiente de 18°C y de unos $15^{\circ}\text{C}/\text{km}$ para el manto litosférico.

Capítulo 7

Discusiones

En este trabajo se ha podido estimar el flujo de calor en la base del relleno sedimentario de la cuenca de Talca, mediante la medición de la concentración de elementos radiogénicos en distintas litologías y el cálculo de la producción de calor a partir de estas. Considerando las litologías principales, su proporción dentro de cada unidad geológica y su emplazamiento, es posible estimar el flujo de calor de una manera rápida y con menor costo que el cálculo de flujo de calor mediante pozos profundos.

7.1. Elementos radiogénicos U, Th, K

La relación Th/U es en promedio de 5,06 en la zona de estudio, lo cual es mayor que el promedio mundial de 4; esto puede deberse a la alta movilidad del U, que es mayor que la movilidad del Th, el U al entrar en contacto con la superficie, se oxida pasando a U^{+6} el cual es muy móvil, en contacto con el agua se hace soluble y fluye disuelto a cotas más bajas, hasta los acuíferos, en condiciones normales el uranio se conservaría disuelto hasta que las aguas encontrasen una salida; que parece ser lo que ocurre en la zona de estudio, puesto que para precipitar el U a U^{+4} se necesitan condiciones reductoras, que no están presentes, condiciones dadas por areniscas y/o unidades con abundancia de materia orgánica, condiciones que solo poseen las rocas metamórficas de la costa y del Triásico.

Se observa en el mapa 5.5 que la relación Th/U aumenta progresivamente desde las rocas más antiguas en la costa (Triásico) hasta las rocas más jóvenes en la zona de Talca (Cretácico). Este comportamiento es compatible con efectos de meteorización y movilidad del U. Este factor es de gran importancia, pues se podría estar subestimando la cantidad de U en las rocas frescas en profundidad, que no han sido expuestas a meteorización o al paso de fluidos, con lo cual se estaría subestimando la producción de calor radiogénico y a su vez el flujo de calor en superficie.

En la figura 7.1 se aprecia que las rocas están empobrecidas en U respecto a la media mundial, en la figura 7.2 se observa una distribución homogéneo de muestras entorno a la media mundial, cosa que no ocurre en este caso.

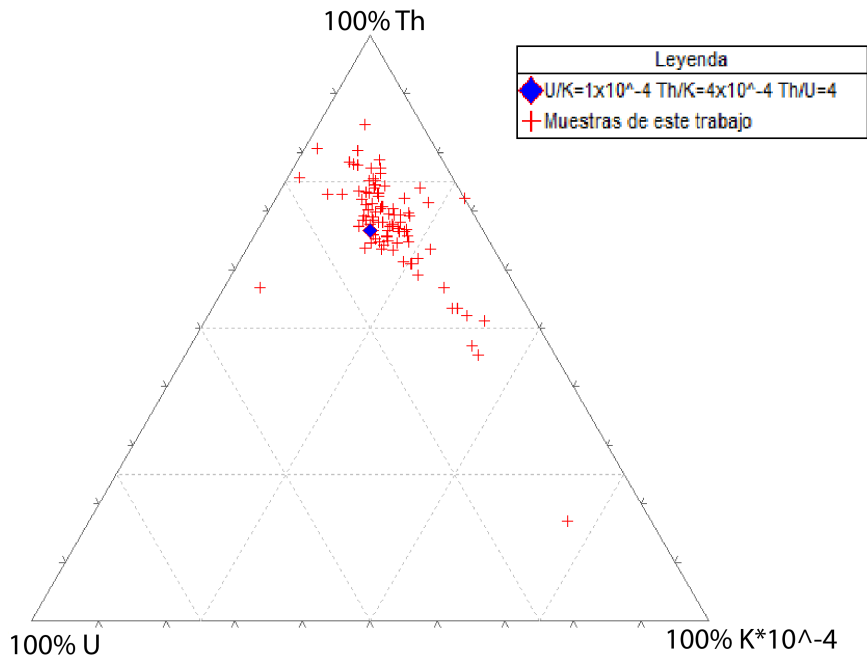


Figura 7.1: Distribución de las muestras según su contenido de U(ppm), Th(ppm) y K(%).

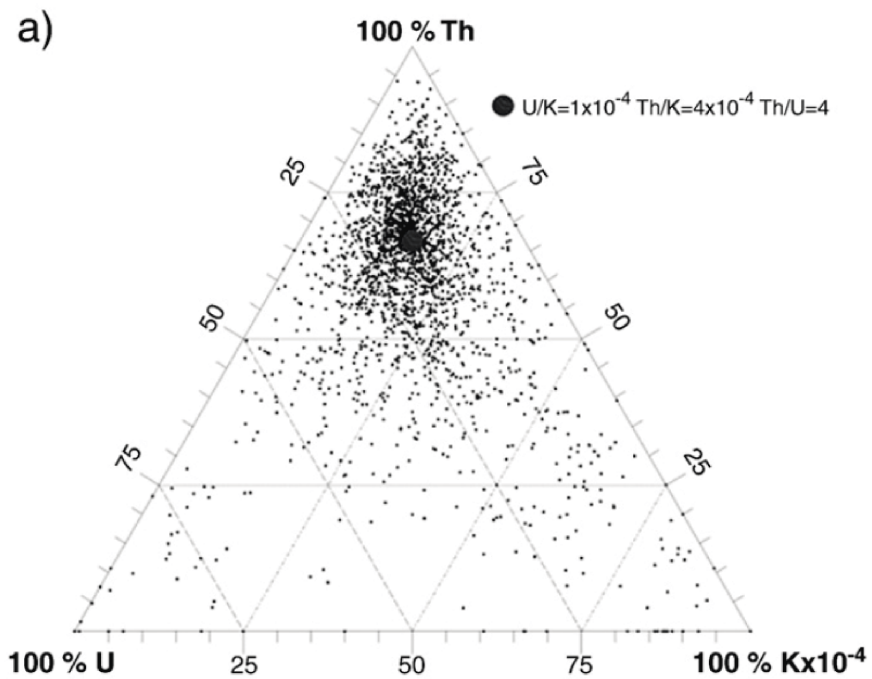


Figura 7.2: Distribución de las muestras según su contenido de U(ppm), Th(ppm) y K(%), compilación mundial realizada por Vilà (2012).

7.2. Producción y flujo de calor

Considerando solamente la corteza superior (primeros 10 km aproximadamente), la producción de calor total estimada para esta, calculada ponderando el RHP de cada unidad geológica por su volumen, se estima en $1,3 \mu W/m^3$, cifra similar a la entregada por He (2009) correspondiente a $1,1 \mu W/m^3$.

En este trabajo se ha dado un fuerte enfoque al control litológico de la producción de calor, debido a que actualmente el nivel de precisión necesario para calcular el flujo de calor en zonas de menor extensión, escapan a las antiguas aproximaciones mediante formulas simples y/o aproximaciones geofísicas ((He et al., 2009), (Vilà et al., 2010), (Hasterok y Chapman, 2011)). Por ejemplo en Sierra Nevada donde el modelo de decrecimiento exponencial de producción de calor radiogénico fue propuesto, una compilación reciente muestra que el RHP no decrece exponencialmente con la profundidad (Brady et al., 2006).

Existen mas de 10.000 mediciones de flujo de calor en continentes y sus margenes, el promedio bruto de estas mediciones es de $80 mW/m^2$ (Pollack et al., 1993 en (Hasterok y Chapman, 2011)), pero estos datos están sesgados, puesto que la mayoría de los datos pertenecen a mediciones hechas en zonas geotermales de alto flujo y existen muchas áreas sin datos, como en el escudo brasileño, en África y en nuestro país los datos son mínimos. En Estados Unidos, existe una larga fracción de datos (+2000) a traves de la provincia del Basin and Range. Excluyendo estos datos la media continental es de tal solo $66 mW/m^2$ (Hasterok y Chapman, 2011), por otro lado un estudio similar es presentado por Mareschal (2012) con un flujo de calor de $64 mW/m^2$ (Mareschal y Jaupart, 2012) lo cual no esta alejado del valor entregado en este trabajo que alcanza los $65 mW/m^2$, considerando solamente el calor radiactivo y la diferencia de temperatura en la base del manto litosférico y la superficie.

7.3. Modelación

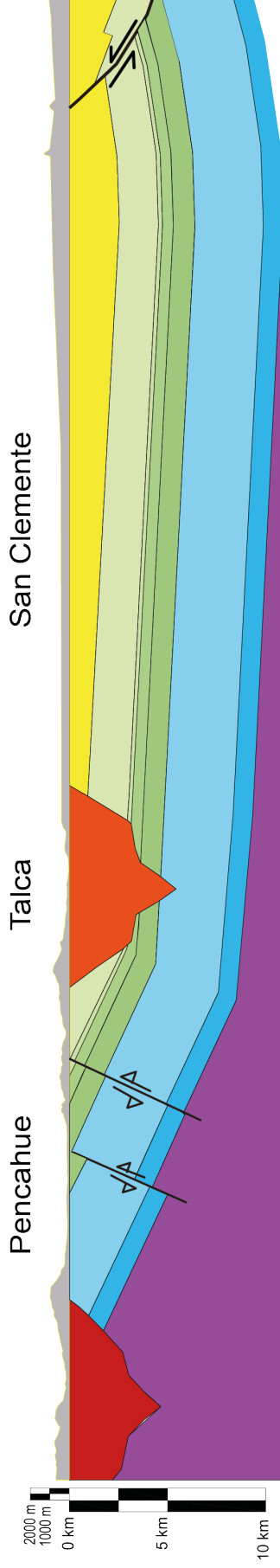
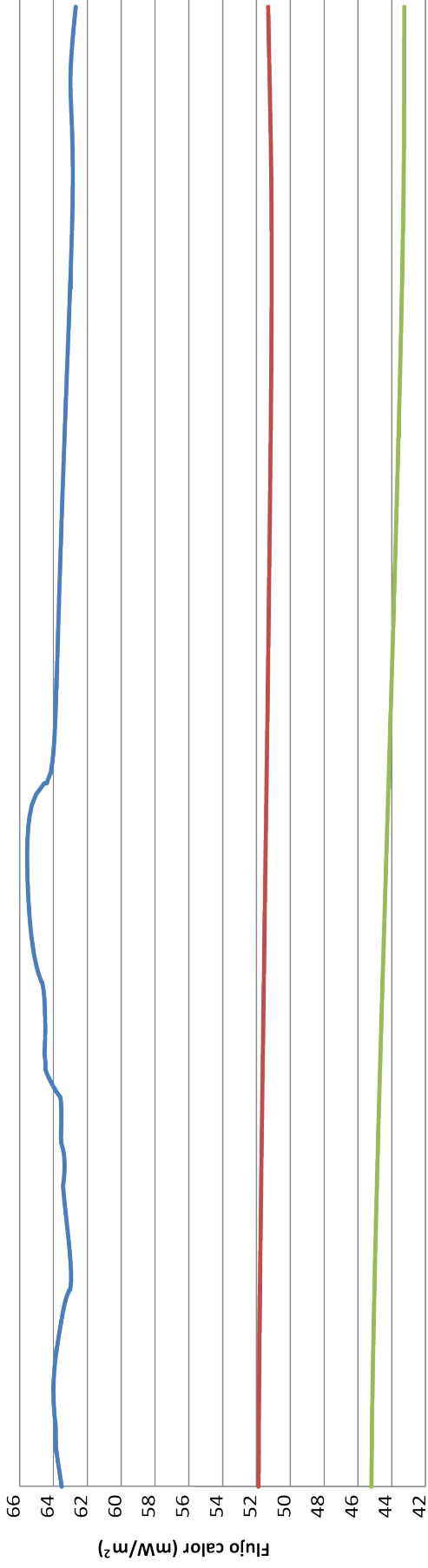
El flujo calórico aumenta, desde la base de la litósfera hacia la superficie, desde $35 mW/m^2$ hasta $65 mW/m^2$, debido al RHP y a que el gradiente termal en la base de la litósfera es menor y la conductividad termal de las rocas disminuye con el aumento de la temperatura. El Flujo calórico que llega a la base del relleno sedimentario en la cuenca de Talca varía entre $62 mW/m^2$ al oeste y $65 mW/m^2$ al este (ver figura 7.3). Del total de flujo calórico que llega hasta la superficie de la litosfera, $45 mW/m^2$ se producen por la diferencia de temperaturas entre la base de la litósfera y la superficie, $52 mW/m^2$ son aportados por la desintegración radiactiva de elementos en el manto litosférico, corteza inferior y media. La desintegración radiactiva de elementos en la corteza superior aporta $13 mW/m^2$ al flujo calórico total que llega hasta la superficie, representando un 20 % del total (ver figura 7.3).

El flujo calórico en superficie es aumentado por la presencia de intrusivos que tienen un RHP superior al promedio de la corteza superior. Considerando los valores máximos y mínimos de producción de calor radiogénico en cada unidad de la litósfera, el valor de flujo calórico que llega hasta la superficie, tiene un valor mínimo posible de $62 mW/m^2$ y un valor

máximo de 70 mW/m^2 . Esta variación no es lineal, debido a que las propiedades termal, son dependientes de la temperatura. La capacidad calórica a presión constante no afecta al flujo calórico que llega a la superficie, porque la modelación de transferencia de calor se hizo considerando un caso estacionario. La temperatura en la corteza superior varía entre 13°C y 250°C , presentando en el kilómetro 1 una temperatura de 35°C y alcanzando temperaturas sobre 100°C bajo los 4 km, ver figura 6.7.

La temperatura en el Moho, varía entre 570°C y 680°C , siendo representativa de las temperaturas esperadas, para este límite de la litósfera (ver figura 6.7). El gradiente de temperatura cerca de la superficie, en la cuenca de Talca es de 23°C/km y no hay variación de oeste a este apreciable. El gradiente termal en la corteza media e inferior está entre 18°C/km y 19°C/km . El gradiente termal en el manto litosférico está entre 15°C/km y 17°C/km , ver figura 6.8. En la parte inferior de la litósfera, el gradiente de temperatura es menor, haciendo el flujo calórico más pequeño.

Flujo de calor en superficie



— Flujo de calor total.

— Flujo de calor sin incluir la producción de calor de la corteza superior.

— Flujo de calor por diferencia de temperatura entre la base de la litosfera y la superficie.

Figura 7.3: Comparación de tres flujos de calor. En verde el flujo de calor producido únicamente por la diferencia de temperatura entre la base de la litósfera (1.000°C) y la superficie (13°C); en rojo el flujo de calor debido a la diferencia de temperatura entre la base de la litósfera y la superficie sumado al RHP del manto litosférico ($0,02\mu\text{W}/\text{m}^3$), la corteza inferior ($0,37\mu\text{W}/\text{m}^3$) y la corteza media ($0,87\mu\text{W}/\text{m}^3$); finalmente en azul el flujo de calor total en la superficie debido a la diferencia de temperatura entre la base de la litósfera y la superficie y el RHP del manto litosférico, la corteza inferior, media y superior.

Capítulo 8

Conclusiones

8.0.1. Elementos Productores de Calor Radiogénico (RHPe)

En promedio las rocas en el área de estudio tienen una media de U de 2,0 ppm, Th 10,2 ppm y K 2,7 %, la relación Th/U, es de 5,0, el cual muestra un leve enriquecimiento de Th respecto a la media mundial de 4,00; La razón K/U es de 1,2 lo cual esta levemente superior a la media mundial de 1,0.

Las concentraciones de U, varían desde los 0,0 ppm hasta los 8,1 ppm, por su parte las concentraciones de Th, varían desde los 1,0 ppm hasta los 34,1 ppm y finalmente las concentraciones de K, varían desde los 0,1 % hasta los 10,3 %.

8.0.2. Producción de calor radiogénico (RHP)

Las rocas con mayor producción de calor radiogénico, corresponden a las pertenecientes a las Ignimbritas de Cerro Caupolicán, con un promedio de $2,8 \mu W/m^3$.

Las rocas con menor producción de calor radiogénico, corresponde a las pertenecientes a las rocas de la formación Abanico, con un promedio de $0,4 \mu W/m^3$.

La litología con mayor producción de calor corresponden a las rocas metamórficas del Basamento Metamórfico (esencialmente pizarras), aunque las tobas pertenecientes presentan peaks de RHP como en la formación Ignimbritas de Cerro Caupolicán, en general presentan una enorme variabilidad que impide de momento identificarlas con un RHP en particular.

Las rocas que presentan mayor variabilidad de RHP, son las ígneas ($0,1$ a $4,1 \mu W/m^3$) seguidas por las sedimentarias ($1,0$ a $3,0 \mu W/m^3$) y por ultimo las metamórficas ($1,3$ a $3,2 \mu W/m^3$).

Ponderando la producción de calor de cada unidad geológica por su volumen, se puede estimar un producción de calor media para la corteza superior de $1,3 \mu W/m^3$.

8.0.3. Flujo de Calor

El flujo de calor estimado para la cuenca de Talca es de 62 mW/m^2 - 65 mW/m^2 , siendo 65 mW/m^2 bajo la ciudad de Talca.

El flujo de calor generado en la corteza superior es de 15 mW/m^2 , lo que equivale a un 23 % del flujo total; la corteza media aporta con 8 mW/m^2 , siendo un 12 %; la corteza inferior aporta 4 mW/m^2 , que representa un 6 %; el aporte del manto litosférico es de $\leq 1 \text{ mW/m}^2$ siendo el ≤ 1 % del total. El flujo estimado proveniente del manto (sólo por diferencia de temperatura) es de 44 mW/m^2 con un 68 % del total.

8.0.4. Gradiente termal

El gradiente termal obtenido de la modelación con elementos finitos es de $23^\circ\text{C}/\text{km}$ para la corteza superior en la zona de Talca, sin presentar variaciones importantes longitudinalmente. Esto se explica por una conductividad termica de $2,9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ y un flujo de calor de $65,5 \text{ mW/m}^2$

8.0.5. Implicancias para el uso directo de la geotermia de muy baja entalpía

- Cualquier modelo que pretenda explicar la transferencia de calor en el acuífero contenido en el relleno sedimentario de la cuenca de Talca, debe considerar como condición de borde un flujo calórico basal de 65 mW/m^2 .
- La presencia de fuentes termales alejadas del volcanismo activo, que puedan ser relacionadas a la circulación profunda de agua subterránea, serán explicadas por un gradiente termal de $23^\circ\text{C}/\text{km}$.
- La presencia de fuentes termales que no pueda ser explicada por un gradiente termal de $23^\circ\text{C}/\text{km}$, debe ser asociada a una anomalía termal que no fue considerada en este trabajo, como por ejemplo cercanía a volcanismo activo.

Bibliografía

- Aguirre, L. Geología de los andes de Chile central, provincia de Aconcagua. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N° 9*, 70p., 1960.
- Alfaro, A. *Peligro Sísmico en el Segmento Norte de la Región del Maule, Chile*. Memoria de Título, Universidad de Chile, 2011.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., y Kausel, E. The west andean thrust, the San Ramón fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2):n/a–n/a, 2010. ISSN 1944-9194. doi: 10.1029/2008TC002427. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2008TC002427>.
- Benavente, O. Actividad hidrotermal asociada a los complejos volcánicos Planchón-Peteroa y Descabezado Grande-Quizapu-Cerro Azul, 35°S y 36°S, zona volcánica sur, Chile. *Memoria de Título, Universidad de Chile*, 2010. URL <http://tesis.uchile.cl/handle/2250/103949>.
- Brady, R. J., Ducea, M. N., Kidder, S. B., y Saleeby, J. B. The distribution of radiogenic heat production as a function of depth in the Sierra Nevada batholith, California. *Lithos*, 86(3–4): 229 – 244, 2006. ISSN 0024-4937. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2005.06.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493705001301>.
- Bravo, P. *Geología del Borde Oriental de la Cordillera de la Costa entre los Ríos Mataquito y Maule, VII Región*. Memoria de Título, Universidad de Chile, 2001.
- Castro, A., Vogt, K., y Gerya, T. Generation of new continental crust by sublithospheric silicic-magma reamination in arcs: A test of Taylor's andesite model. *Gondwana Research*, 23(4):1554 – 1566, 2013. ISSN 1342-937X. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.07.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X12002444>.
- Cheng, A. H.-D. y Cheng, D. T. Heritage and early history of the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29(3):268–302, 2005.
- Christensen, N. I. y Mooney, W. D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B6): 9761–9788, 1995. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/95JB00259. URL <http://dx.doi.org/10.1029/95JB00259>.

- Clauser, C. Radiogenic heat production of rocks. *Meteorites*, 100(17):000, 2011.
- Escobar, F., Guzman, R., y Vieira, G. Avance geológico de las hojas rancagua-curicó, talca-linares, chanco, concepción-chillán. *Santiago: USGS, CCHEN, IIG. 56p*, 1977.
- Faccenda, M., Gerya, T. V., y Chakraborty, S. Styles of post-subduction collisional orogeny: Influence of convergence velocity, crustal rheology and radiogenic heat production. *Lithos*, 103(1):257–287, 2008.
- González, O. y Vergara, M. Reconocimiento geológico de la cordillera de los andes entre los paralelos 35° y 38° latitud sur. *Instituto de Geología. Publicación N° 24. 121 pp.*, 1962.
- González, A. Análisis estructural entre los valles del río tinguiririca y teno, cordillera principal de Chile central: Microsismicidad y geología superficial. *Memoria para optar al título de Geóloga, Universidad de Chile*, 2008.
- Hall, P. S. On the thermal evolution of the mantle wedge at subduction zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 198:9–27, 2012.
- Hamza, V., Cardoso, R., y Neto, C. P. Spherical harmonic analysis of earth's conductive heat flow. *International Journal of Earth Sciences*, 97(2):205–226, 2008.
- Hans Wedepohl, K. The composition of the continental crust. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 59(7):1217–1232, 1995.
- Hasterok, D. y Chapman, D. Heat production and geotherms for the continental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1–2):59 – 70, 2011. ISSN 0012-821X. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.034>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X11002500>.
- Hauser, A. Hoja talca, carta hidrogeológica de Chile n°2. *Servicio Nacional de Geología*, (N° 2), 1995.
- He, L., Hu, S., Yang, W., y Wang, J. Radiogenic heat production in the lithosphere of sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3–4):525 – 538, 2009. ISSN 0012-821X. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.11.022>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X0800736X>.
- Henkel, H. Studies of density and magnetic properties of rocks from northern Sweden. *pure and applied geophysics*, 114(2):235–249, 1976. ISSN 0033-4553. doi: 10.1007/BF00878948. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00878948>.
- Krawczyk, C., Mechie, J., Lüth, S., Tašárová, Z., Wigger, P., Stiller, M., Brasse, H., Echtler, H., Araneda, M., y Bataille, K. Geophysical signatures and active tectonics at the south-central Chilean margin. In Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.-J., Ramos, V., Strecker, M., y Wigger, P., editors, *The Andes*, *Frontiers in Earth Sciences*, pages 171–192. Springer Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-24329-8. doi: 10.1007/978-3-540-48684-8_8. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-48684-8_8.

- LeMaitre, R. W., Bateman, P., J., A. D., y Keller. *Classification of Igneous rocks and Glossary of Term: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1989.
- López, L. Modelo estructural a lo largo de los 33°45's restringido por métodos geofísicos. *Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile*, 2008. URL <http://tesis.uchile.cl/handle/2250/104944>.
- Mareschal, J.-C. y Jaupart, C. Radiogenic heat production, thermal regime and evolution of continental crust. *Tectonophysics*, (0):–, 2012. ISSN 0040-1951. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004019511200769X>.
- Merriman, J. D., Whittington, A. G., Hofmeister, A. M., Nabelek, P. I., y Benn, K. Thermal transport properties of major archean rock types to high temperature and implications for cratonic geotherms. *Precambrian Research*, 233(0):358 – 372, 2013. ISSN 0301-9268. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2013.05.009>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926813001629>.
- Morel, R. *Geología del sector Norte de la Hoja Gualleco, entre los 35° 00' y 35° 10' Lat. S, Provincia de Talca, VII Región, Chile*. Tesis de Magister, Universidad de Chile, 1981.
- Moscoso, E., Grevemeyer, I., Contreras-Reyes, E., Flueh, E. R., Dzierma, Y., Rabbel, W., y Thorwart, M. Revealing the deep structure and rupture plane of the 2010 maule, chile earthquake (mw=8.8) using wide angle seismic data. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1–2):147 – 155, 2011. ISSN 0012-821X. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.025>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X1100241X>.
- Robie, B. S., Richard A.; Hemingway. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 k and 1 bar (10⁵ pascals) pressure and at higher temperatures. *USGS Numbered Series*, 2131:iv, 461 p. ;28 cm., 1995.
- Rudnick, R. y Gao, S. 3.01 - composition of the continental crust. In in Chief: Heinrich D. Holland, E. y Turekian, K. K., editors, *Treatise on Geochemistry*, pages 1 – 64. Pergamon, Oxford, 2003. ISBN 978-0-08-043751-4. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080437516030164>.
- Rudnick, R. L. y Fountain, D. M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3):267–309, 1995.
- Rybach, L. Determination of heat production rate. *Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination*, page 486, 1988.
- Rybach, L. y Buntebarth, G. *Relationships between the petrophysical properties density, seismic velocity, heat generation, and mineralogical constitution*. Number 57. Earth Planet. Sci. Lett., 1982.

- Schärli, U. y Rybach, L. Determination of specific heat capacity on rock fragments. *Geothermics*, 30(1):93 – 110, 2001. ISSN 0375-6505. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505\(00\)00035-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00035-3). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650500000353>.
- Sernageomin. Carta geológica de Chile (escala 1:1.000.000). *Publicación Geológica Digital 4.*, 2003.
- Sousa Camposinhos, R. Natural stone characterization. In *Stone Cladding Engineering*, pages 9–35. Springer Netherlands, 2014. ISBN 978-94-007-6847-5. doi: 10.1007/978-94-007-6848-2_2. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-6848-2_2.
- Spichiger, S. *Geología y estilo estructural de un perfil de los Andes Chilenos, a 35° Latitud Sur, con énfasis en la Cordillera de la Costa, VII Región*. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 1993.
- Springer, M. Interpretation of heat-flow density in the central andes. *Tectonophysics*, 306(3–4):377 – 395, 1999. ISSN 0040-1951. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00067-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00067-0). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195199000670>.
- Tapia, F. Análisis estructural del sector occidental de la faja plegada y corrida de malargüe en el curso superior del río Colorado de Lontué (35°18' y 35°23's), región del Maule, Chile. *Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile*, 2010.
- Tassara, A. Factors controlling the crustal density structure underneath active continental margins with implications for their evolution. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(1), 2006.
- Tassara, A. y Echaurren, A. Anatomy of the Andean subduction zone: three-dimensional density model upgraded and compared against global-scale models. *Geophysical Journal International*, 189(1):161–168, 2012. ISSN 1365-246X. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05397.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05397.x>.
- Uyeda, S. y Watanabe, T. Terrestrial heat flow in western South America. *Tectonophysics*, 83(1):63–70, 1982.
- Vigneressse, J. y Clemens, J. Granitic magma ascent and emplacement: neither diapirism nor neutral buoyancy. *Geological Society, London, Special Publications*, 174(1):1–19, 2000.
- Vilà, M., Fernández, M., y Jiménez-Munt, I. Radiogenic heat production variability of some common lithological groups and its significance to lithospheric thermal modeling. *Tectonophysics*, 490(3–4):152 – 164, 2010. ISSN 0040-1951. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2010.05.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195110002064>.
- Vosteen, H.-D. y Schellschmidt, R. Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(9–11):499 – 509, 2003. ISSN 1474-7065. doi:

[http://dx.doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00069-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00069-X). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147470650300069X>. <ce:title>Heat Flow and the Structure of the Lithosphere</ce:title>.

Waples, D. y Waples, J. A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. part 1: Minerals and nonporous rocks. *Natural Resources Research*, 13(2):97–122, 2004. ISSN 1520-7439. doi: 10.1023/B:NARR.0000032647.41046.e7. URL <http://dx.doi.org/10.1023/B%3ANARR.0000032647.41046.e7>.