

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL
REGISTRADO DURANTE LOS PROCESOS DE ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL SECTOR
DE LA OROGÉNESIS ANDINA MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES DE
SATELITE Y DATOS CLIMATOLÓGICOS

LUIS ALFONSO ECHEVERRY VILLAMIL

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI, VALLE DEL CAUCA

2014

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL
REGISTRADO DURANTE LOS PROCESOS DE ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL SECTOR
DE LA OROGÉNESIS ANDINA MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES DE
SATELITE Y DATOS CLIMATOLÓGICOS

LUIS ALFONSO ECHEVERRY VILLAMIL

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Topográfico

Director

Francisco Luis Hernández Torres M.Sc.

Codirector

Alfonso Ramón Condal Beretta Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI, VALLE DEL CAUCA

2014

Nota de Aceptación:

Francisco Luis Hernández Torres

Alfonso Ramón Condal Beretta

Jurado 1

Jurado 2

Santiago de Cali (Julio de 2014)

AGRADECIMIENTOS

Solo puedo agradecer a la voluntad y guía del Padre Celestial que inspira y fortalece. De esta forma culmina una etapa de preparación hacia la búsqueda del conocimiento y la investigación, de la cual participaron con su interés y apoyo personas gratas que animaron un camino de beneficio particular.

Agradezco inmensamente a mi familia por su colaboración y confianza: mis padres Lucy Villamil y Alfonso Echeverry, mis hermanas Maribel, Patricia, Paola, Gisell, Madeleine y Geraldin, mis sobrinos en especial a Juan Esteban Ramos, María José Carrillo y Alexander Zuluaga que en un tiempo no muy lejano comprenderán lo que hicieron por su tío; a mis amigos por su interés y motivación: Paula Paz, Lina Espinel, Lizzette Tello, Marcela Aguirre, Carolina Echavarría, César Ossa, Gerardo Muriel, Juan Galeano, Natalia García y Saray Puentes; a mis profesores por su dedicación y formación: Ana Arbeláez, Francisco Hernández, Leonardo Ordoñez, Olga Baquero y Walter Marín.

Agradezco inmensamente la iniciativa de investigación y el apoyo académico brindado por los profesores Francisco Hernández del grupo GIPER y Alfonso Condal, quienes con sus conocimientos alimentaron la pasión de continuar explorando un campo no ajeno a mis gustos; a Carolina Muñoz integrante del grupo GISMODEL por su disposición y colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
3. OBJETIVOS	16
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. JUSTIFICACIÓN.....	17
5. MARCO TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN.....	19
5.1. MARCO CONCEPTUAL.....	19
5.1.1. Conceptos sobre Percepción Remota.....	19
5.1.2. Conceptos Geológicos.....	20
5.1.3. Otros Conceptos.....	25
5.2. MARCO TEÓRICO.....	26
5.2.1. Teoría de Mecánica de Rocas.....	26
5.2.2. Teoría de Desgasificación.....	28
5.2.3. Teoría de Ionización del aire y calor latente incidente.....	30
5.2.4. Comportamiento Espectral de las Superficies en el TIR.....	31
5.2.5. Correlación entre las tendencias térmicas del aire y el suelo	34
5.3. MARCO REFERENCIAL	35
6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	43
6.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	44
6.2. MATERIALES Y EQUIPOS	44
6.3. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO SÍSMICO Y PRESENTACIÓN DE IMPACTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO: Sismo del 27 de Febrero de 2010 en Cauquenes, Maule, Chile. 45	
6.4. CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS Y AMBIENTALES EN ZONA AFECTADA DURANTE SISMO EN CAUQUENES	46
6.4.1. Marco histórico y tendencia sísmica regional	46
6.4.2. Unidades, estructuras litológicas y períodos geológicos regionales	48
6.4.3. Descripción y categorización de Coberturas Superficiales.....	55
6.4.4. Tendencia, categorización y comportamiento térmico regional	60

6.5. OBTENCIÓN DE COMPORTAMIENTO LST MEDIANTE EL USO DEL PRODUCTO MOD11A1 Y DEFINICIÓN DE CLASES TÉRMICAS DE TENDENCIA ANÓMALA	63
6.6. CRUCE DE VARIABLES ESPACIALES FRENTE A LA VARIACIÓN TÉRMICA	64
6.7. VALIDACIÓN DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL.....	65
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	67
7.1. VARIACIÓN TÉRMICA SUPERFICIAL EN FUNCIÓN A LA FECHA DEL SISMO	67
7.1.1. Comportamiento LST y clasificación térmica en la identificación de rango anómalo temporal.....	67
7.1.2. Gráficos de variación (TVC) y tendencia térmica en estaciones climatológicas de la base temporal.	73
7.2. DINÁMICA DE LA ANOMALÍA TÉRMICA RESPECTO A LA UBICACIÓN GEOGRÁFICAS DE LAS VARIABLES SUPERFICIALES	78
7.2.1. Comportamiento térmico en función de la geología regional	78
7.2.2. Comportamiento térmico en función de las coberturas superficiales regionales	81
7.2.3. Comportamiento térmico en función de los periodos geológicos de formación litológica	83
7.3. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN Y CONJUNTO DE PENDIENTES DE REGRESIÓN LINEAL EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN DE REGISTROS TÉRMICOS.....	86
8. DISCUSION.....	88
9. CONCLUSIONES.....	91
BIBLIOGRAFIA.....	93
ANEXOS	98

TABLA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Corrientes de Convección en zonas de subducción provocando orogenia continental</i>	20
<i>Figura 2. Distribución de Placas Tectónicas</i>	21
<i>Figura 3. Tipos de Fallas Geológicas: Normal, Inversa, de Rumbo (izquierda-derecha). ..</i>	22
<i>Figura 4. Incremento térmico durante aplicación de fuerzas de compresión sobre una muestra de granito.</i>	28

<i>Figura 5. Variación de flujos de CO₂ en el suelo del volcán La Solfarata (Italia), las tonalidades por encima del rojo en la escala representan asociación directa a procesos internos de desgasificación.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6. Variación de la actividad sísmica (A) con relación a la variación térmica del aire obtenida de MODIS Terra y Aqua (B) y datos locales de la temperatura (C) en torno al sismo en Colima (México) 7.6 Mw en 22 de enero de 2003.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 7. Espectro Electromagnético.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 8. (a) registro LST obtenido del producto MOD11A1, (b) producto de estimación de temperatura del aire mediante el desarrollo del modelo TEST</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9. (Izquierda) Series de tiempo LST noche en Bam antes y después del terremoto del 26 de diciembre de 2003. (Derecha) Series de tiempo LST día. Una anomalía térmica intensa se puede ver el 24 de diciembre de 2003, 2 días antes del terremoto.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10. Mapa LST a partir de registros día NOAA-AVHRR antes y después del sismo en Dahoeieh-Zarand del febrero 22 de 2005. El 21 de febrero de 2005 en la anomalía de temperatura se registró la variación máxima.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11. Comparación de anomalía térmica en terremoto del 22 de febrero de 2005 derivado NOAA-AVHRR (a), con el mapa de la deformación InSAR (b) generado por el movimiento en Zarand.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 12. Periodos anormales y evolución del espectro de potencia de la temperatura de brillo para el terremoto de Wenchuan 8.0 Mw en 2008.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 13. Observaciones de la respuesta térmica anómala en el terremoto del 21 de junio de 1996 en Kamchatka.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14. (a) Mapa clasificado de cobertura de la tierra. (b) Mapa LST después de la corrección topográfica y atmosférica, sin alteración, de las regiones cubiertas por la temperatura más baja y más alta. (c) el mejor mapa LST de contorno mediante la interpolación de fragmentos.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15. Cobertura térmica anómala durante evento sísmico en Ghuj. Derecha a izquierda: comportamiento térmico en los días 18, 20, 21, 22 de enero de 2001</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16. Variación térmica superficial durante sismo de Boumerdes en 2003. (Izquierda-derecha) el 18 de mayo se alcanza el máximo cubrimiento anómalo positivo y el 20 de mayo, un día antes del sismo, se registra el fenómeno de surgencia que afecta el LST sobre la costa.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17. Variación espacial térmica inferida mediante datos de estaciones meteorológicas durante la época del sismo de Michoacán en 1985.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 18. Diagrama metodológico.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 19. Presentación del entorno geográfico y localización de la zona de estudio y epicentro (punto rojo) para el sismo del 27 de febrero de 2010 en Chile.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 20. Dinámica de convergencia y subducción de placas en la región cordillerana andina de Chile y Sur América.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 21. Izquierda: Distribución espacial de movimientos posteriores al evento principal. Derecha: Distribución temporal de las réplicas en función de su magnitud y el número de sismos por día registrados hasta tres meses después del evento principal.</i>	<i>48</i>

<i>Figura 22. Sistemas morfoestructurales y regiones político-administrativas en zona de estudio; el punto rojo representa la ubicación del epicentro para el sismo del 27 de febrero de 2010.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 23. Mapa Geológico de Chile georreferenciado para proceso de digitalización de unidades geológicas, sección: hoja 2 de 3 (30°30'-43°30').....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24. Izquierda: Periodo de formación geológica de unidades litológicas en zona de estudio. Derecha: Tipo de formación litológica presente en zona de estudio.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 25. Principales sistemas de fallas geológicas identificadas.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 26. (a) Unión de Tiles h11v12 y h12v12 correspondientes a banda LAI/fPAR. (b) Reclasificación de los valores enteros de pixel a las 11 clases de cubiertas. Coberturas superficiales 2009 (c) y 2010 (d) para región de interés, reproyectadas a Sistema WGS84.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 27. Dinámica de coberturas superficiales en 2010(anillo externo) respecto al año 2009 (anillo interno).</i>	<i>59</i>
<i>Figura 28. (a) Clasificación por descripción de entornos climáticos. (b) Clasificación por tendencia térmica de entornos climáticos, la región naranja representa los entornos con temperaturas máximas de 24°C y la región en rojo los entornos con temperaturas ente 24-31°C, siendo 31°C el valor máximo.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 29. Estaciones climatológicas con mayor incremento térmico durante la semana del 27 de febrero de 2010</i>	<i>63</i>
<i>Figura 30. Comportamiento térmico registrado en la zona de estudio entre febrero 20 a marzo 2 para el año 2009.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 31. Comportamiento térmico registrado en la zona de estudio entre febrero 20 a marzo 2 para el año 2010.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 32. Comportamiento térmico en serie de análisis temporal bajo clasificación por rangos térmicos específicos.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 33. Distribución de variaciones LST por clases térmicas</i>	<i>73</i>
<i>Figura 34. Afectación térmica por dinámica LST en las diferentes Estaciones Climatológicas presentes en la zona de estudio.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 35. Muestra serial obtenida en el proceso de intersección entre variables superficiales y la serie térmica. (a) resultado de serie para coberturas superficiales, (b) resultado de serie para componente litológica, (c) resultado de serie para periodos geológicos.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 36. Distribución de la anomalía térmica (cian) sobre la componente litológica y sistemas de fallas geológicas (línea roja) en la zona de estudio.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 37. Distribución de la anomalía térmica (cian) sobre la componente de coberturas superficiales y sistemas de fallas geológicas en la zona de estudio.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 38. Distribución de la anomalía térmica (cian) sobre la componente de periodos geológicos y sistemas de fallas geológicas en la zona de estudio.</i>	<i>85</i>

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Conjunto de imágenes satelitales

Tabla 2. Información geológica descriptiva para cada capa vectorial

Tabla 3. Descripción de Tipo de Cobertura Terrestre (Esquema 3).

Tabla 4. Frecuencia y área de las diferentes coberturas superficiales en zona de análisis.

Tabla 5. Variabilidad superficial de coberturas respecto a datos de 2009

Tabla 6. Datos geográficos de Estaciones Climatológicas

Tabla 7. Reclasificación para valores de variables de estudio

Tabla 8. Registro térmico por ubicación de estación climatológica durante el periodo de análisis

Tabla 9. Registro LST en km² bajo clasificación térmica regional para análisis de tendencias y comportamiento térmico superficial en serie temporal 2010.

Tabla 10. Datos de variabilidad y dinámica superficial (km²) entre la anomalía térmica y la componente litológica en la zona de estudio.

Tabla 11. Datos de variabilidad y dinámica superficial (km²) entre la anomalía térmica y la componente de coberturas superficiales en la zona de estudio.

Tabla 12. Datos de variabilidad y dinámica superficial (km²) entre la anomalía térmica y la componente de periodos geológicos en la zona de estudio.

Tabla 13. Índices de correlación entre datos térmicos por ubicación geográfica de estaciones climatológicas

RESUMEN

El avance y desarrollo computacional en el manejo de datos espaciales brinda una alternativa hacia la consolidación de una geología moderna, ya que la información obtenida por medio del tratamiento a datos satelitales permite a los científicos una nueva alternativa para analizar y comprender los fenómenos que dominan la dinámica terrestre. En este sentido, la investigación desarrollada se basa en la utilización de productos MODIS sobre contenido superficial característico de coberturas y temperatura, análisis geoestadístico de datos remotos con validación mediante registros en estaciones climatológicas terrestres y el apoyo en teorías geológicas que describen la manifestación térmica superficial como una respuesta de interacción entre la Litósfera y la atmósfera durante los procesos de acoplamiento tectónico u ocurrencia de eventos sísmicos; todo esto enfocado al análisis de la evolución espacio-temporal que registra la temperatura superficial del suelo (LST, por sus siglas en inglés) durante dicho acoplamiento. La metodología planteada se basa en propuestas desarrolladas en estudios sobre LST a nivel mundial, agregando el enfoque dinámico entre la influencia directa que aportan las variables climáticas, geológicas y de coberturas superficiales a la evolución de anomalías térmicas registradas con anterioridad a la ocurrencia de grandes eventos sísmicos; permitiendo caracterizar, cuantificar e identificar cómo se integraron e interactuaron los rangos anómalos en LST sobre zonas cercanas al epicentro del sismo registrado el 27 de febrero de 2010 en Chile.

Las variaciones espacio-temporales más significativas, según los datos capturados en el satélite, iniciaron el 21 de febrero y registraron un máximo de variación el día 24 con un cubrimiento espacial de $79618 \pm 0.25 \text{ km}^2$ y aumentos térmicos de hasta 12°C por encima de perfil térmico normal; esta variación aparece sobre uno de los principales sistemas de fallas tectónicas presentes en la región de estudio, sobre las localidades de Talca, Chillán y Temuco, y se propaga en sentido sur sobre las estructuras geológicas más permeables y recientes, destacando en la variable de cobertura superficial la presencia de hiervas, cultivos bajos y arbustos, en la clase latifoliados, como las coberturas que más contribuyen en la variación del flujo térmico proveniente desde el interior de la corteza o generado por reacción química superficial. Las tendencias térmicas obtenidas en el tratamiento de imágenes de satélite fueron validadas mediante el método de correlación por posición geográfica de cada estación climatológica con registros térmicos dentro de la zona de afectación térmica durante las fechas próximas al evento sísmico estudiado, obteniendo índices de correlación entre 0.77 y 0.98.

PALABRAS CLAVES

Anomalía Térmica, Comportamiento Geotérmico, Sismos y Temperatura Superficial del Suelo (LST).

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de imágenes espectrales permite no solo definir formas y texturas sino también tener información indirecta respecto de la composición química, mineralógica y de variaciones ambientales relacionadas con el suelo en una zona específica de observación, desarrollando de esta forma potentes técnicas de interpretación geológica que apoyan la investigación sobre el comportamiento y dinámica de la corteza terrestre. Como consecuencia de éstos avances, las imágenes espectrales con observación en el infrarrojo térmico (TIR, por sus siglas en inglés) son capaces de registrar y generar imágenes que ofrecen incontables aplicaciones, fundamentalmente en el monitoreo de la superficie terrestre y oceánica, así como el estudio de fenómenos atmosféricos y otras enfocadas al aprovechamiento y estudio ambiental (Deans *et al.*, 2006). En este sentido, en el presente documento se desarrolla una propuesta al tratamiento de información térmica registrada por sensores remotos durante eventualidades sísmicas que permite establecer, según la composición y formación geológica de la Cordillera Andina en el centro-sur de Chile, la relación entre la dinámica y variabilidad de anomalías térmicas bajo la influencia y la presencia de las diferentes coberturas superficiales, implementando métodos lógicos que se ajustan a las condiciones de respuesta espectral de las cubiertas en el trópico.

Para entrar en detalle sobre el tipo de investigación a realizar se define el fenómeno de estudio desde un entorno técnico geológico y se describe su interpretación desde la perspectiva analítica que ofrece el desarrollo en técnicas de percepción remota, puntualizando que: el origen de los movimientos sísmicos, producto de la reacción ante tensiones y estrés en la corteza terrestre, es ocasionado por el aumento en la presión isostática, establecida como una variación de fuerza y energía que hace subir la masa magmática desde el interior de la Tierra a través de fisuras en las rocas hasta las zonas más altas de la superficie; liberando energía acumulada lenta y continuamente entre zonas de fallas tectónicas en las regiones más frías y estables de la Litósfera (Etiopie y Martinelli, 2002); este proceso activa, hacia la superficie, la emanación y flujo de gases y vapores que se desprenden desde las corrientes de convección u otros lugares de actividad química almacenados en grietas o cavidades formando bolsas de gas natural, metano u otros que tras las acciones de tracción o compresión son liberados durante los sismos (Chockalingam y Earl, 2009). La variación por cantidad de estos gases en la superficie está sujeta, según estudios, a la ubicación y magnitud de los movimientos telúricos, ya que la cantidad de energía que se libera de la Litósfera o en un punto variable dentro del radio litosférico se condiciona principalmente por la composición y estructura de la corteza.

Teóricamente se trata de picos de variación térmica por concentración de gases en el suelo o el aire, observados previos a un sismo importante y monitoreados a lo largo de fallas activas para establecer la dependencia entre cambios espaciales significativos de temperatura superficial y la manifestación tectónica (Neumann *et al.*, 2000; Tronin *et al.*, 2002). Aunque se han registrado incrementos superiores al doble de su producción normal, para el caso de gases como el radón, helio y metano; estos aumentos no están sistemáticamente relacionados con las condiciones climáticas, pero sí con la ocurrencia razonable en tiempo y espacio de sismos de magnitud 4.5 Mw o mayor (Wenyuan *et al.*, 2012; Tronin *et al.*, 2002), pues la radiactividad que generan ioniza el aire a gran escala y ocasiona una serie de efectos anómalos debido a que las moléculas de agua se adhieren a los iones en el aire y provocan procesos de condensación y liberación de calor latente

(Etiope y Martinelli, 2002), lo que permite que las emisiones de rayos infrarrojos muestren un rápido incremento de la radiación infrarroja térmica observada a partir de los registros de satélite. Es así como se considera que el calentamiento del suelo dependerá de la cantidad de radiación neta que llegue a la superficie terrestre resultado de considerar el balance energético de onda corta (3-5 μm) y de onda larga (7-12 μm), así como de factores externos al mismo, entre ellos la radiación global disponible, el albedo, y del balance resultante de radiación infrarroja que dependerá de la temperatura y de las emisividades entre la atmósfera y la superficie (Neumann *et al.*, 2000).

El desarrollo de este estudio se basa en métodos planteados por Dimitar *et al.* (2006) sobre la obtención del registro de la temperatura superficial terrestre (LST, por sus siglas en inglés) con el Espectroradiómetro de Imagen de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés), la inclusión de variables físicas superficiales para determinar su influencia sobre la dinámica anómala LST por Zhang *et al.* (2010) y el soporte teórico referente a la variabilidad en LST cerca de la zona epicentral durante las fechas próximas de preparación al evento sísmico planteado por Tronin *et al.* (2004) que explican la interacción entre los diferentes marcos de respuesta anómala en LST y la dinámica térmica que estos ofrecen durante los periodos de desgasificación asociados a movimientos telúricos. Este enfoque metodológico permitió identificar variaciones térmicas de 4 a 12°C en determinadas zonas sobre el sector que ocupan las morfoestructuras de la Cordillera de la Costa y la Depresión Central en las regiones administrativas del Maule y Biobío, así como la variación o aumento anómalo en la temperatura superficial con un área de 79618 km² y registros térmicos máximos de 39.79°C el 24 de febrero, tres días antes del evento sísmico, evidenciando que los mayores registros térmicos y espaciales por aumento de LST se alcanzaron sobre las zonas que superficialmente presentan poca densidad de vegetación o de porte bajo y litológicamente suelos permeables, porosos o de rápida cristalización ricos en material orgánico con edades del Cuaternario y del Carbonífero principalmente.

Esta técnica es aplicable al manejo del riesgo sísmico natural ya que casi todos los fenómenos naturales como los geológicos, hidrológicos y atmosféricos son eventos o procesos recurrentes con tendencia similar de ocurrencia que dejan huellas de los episodios anteriores, y permite conocer los valores asociados a la respuesta anómala térmica del suelo durante eventualidades sísmicas para realizar métodos comparativos de este fenómeno que incluyen reacciones químico-térmicas durante su manifestación en zonas de fallas activas, esperando detectar por medio del análisis y el tratamiento de imágenes satelitales cambios superficiales que conduzcan a la identificación de zonas propensas a reacción por compresión cortical principalmente sobre el sector de orogénesis Andina aplicable a cualquier región en el planeta. De este modo al revelar la ubicación de posibles eventos y distinguir las condiciones en las que hay mayor probabilidad de que éstos ocurran, la técnica permite identificar áreas expuestas durante la manifestación de fracturación cortical y establecer los picos en la anomalía térmica regional que indiquen la cercanía del movimiento en una región específica; todo esto con el objetivo de que se logren incluir las medidas necesarias para reducir el impacto social y económico de los desastres dentro de los procesos de planificación.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la naturaleza los eventos o fenómenos naturales son percibidos como agentes destructores que durante sus procesos de manifestación revelan cómo y posiblemente cuándo afectaran determinados lugares; sin embargo, los terremotos parecen ocurrir de repente y aunque la cantidad de energía que liberan se acumula durante meses y años en forma de tensiones y compresiones en la corteza terrestre aún no es fácil tener un registro detallado de tal progreso, haciendo de éstos eventos, fenómenos hasta hoy impredecibles e incontrolables. En 2012 Magareta Washlström, representante especial de la ONU para la reducción del riesgo por desastres, sostuvo que el costo por catástrofes naturales superó los 380.000 millones de dólares para el año 2011 y tal pérdida fue atribuida principalmente a eventualidades sísmicas, destacando el papel que estos eventos presentan en la economía mundial. De los eventos sísmicos más lamentables y recordados a nivel mundial se tienen los ocurridos en Haití y Chile en 2010, Japón y Nueva Zelanda en 2011; donde el número de víctimas, damnificados y daños materiales los catalogan como los más costosos de la historia. A nivel local, Chile presenta una constante actividad sísmica producto de la localización geográfica y dinámica estructural de la zona que comprende la orogénesis andina, registrándose como los eventos sísmicos más desastrosos e impactantes a nivel socio-cultural y económico los ocurridos en Chillán (1939), Valdivia (1960) y Cauquenes (2010).

Normalmente, los eventos sísmicos son fenómenos asociados a movimientos bruscos y transitorios sobre la superficie terrestre a causa de la liberación de energía acumulada a profundidades considerables (hasta 150 km); sin embargo, desde el punto de vista geológico e investigativo, al interior de la superficie terrestre durante el periodo de acoplamiento por reajuste de tensiones corticales, se originan microfisuras que contraen y dilatan gases presentes en los poros de las rocas involucradas; proceso que genera reacciones geoquímicas y que conduce a la superficie gases altamente reactivos como el Hidrógeno (H_2), Dióxido de Carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), amoníaco (NH_3), menos reactivos como el Helio (He), Metano (CH_4), Ozono (O_3), y nobles o inertes como Argón (Ar), Radón (Rn) estrictamente relacionado con la presencia de CO_2 en el suelo, todos éstos junto con el vapor de agua, una vez localizados cerca de la superficie provocan reacciones térmicas en el suelo que afectan la temperatura normal regional durante el evento (Saraf *et al.*, 2009). La acumulación de estos elementos se presenta de forma particular ya que se concentran y escapan rápidamente a medida que se ejercen cambios fuertes de presión sobre la roca en la que se localizan, haciendo que su ascenso hacia la superficie sea inmediato y que sobre ésta se registren anomalías térmicas antes de que en la corteza se manifiesten los esfuerzos por acoplamiento y se produzca la liberación de energía en forma de movimiento sísmico. Estas anomalías están conformadas por cambios térmicos que pueden mostrar varios picos máximos en la temperatura superficial de la tierra (LST) entre dos semanas a unos cuantos días de anterioridad al evento sísmico y ocupar áreas extensas que en su mayoría cubren miles de km^2 y presentan un aumento entre 5 a $15^{\circ}C$ sobre el perfil térmico normal en áreas cercanas a la zona epicentral, estos cambios térmicos pueden permanecer en la zona afectada entre una a dos semanas después del sismo (Tronin *et al.*, 2002); otros efectos asociados son el aumento en volumen y temperatura de fuentes hídricas. Estos efectos dependen de las condiciones meteorológicas, la geología local, las características del sismo y las condiciones sismo-tectónica de la zona (Dimitar *et al.*, 2006; Filizzola *et al.*, 2004).

Una explicación a tal observación se sustenta en que días antes de que ocurra el sismo se inicia, por efectos de compresión, la liberación de los gases contenidos en las rocas a través de microfisuras del orden de 10^{-2} a 10^1 mm a profundidades de miles de metros con velocidades de 10^0 a 10^3 m por día (Etiope y Martinelli, 2002), conformando flujos en fase gaseosa, desplazamientos de agua con gas y burbujas que al unirse a masas gaseosas subterráneas se direccionan a zonas de menor densidad provocando el aumento rápido y constante de la temperatura al entrar en contacto con fuentes de suministro de humedad cercanas a la superficie; de esta forma se inicia la ionización del aire y se consolida un proceso de migración importante (Pulinets *et al.*, 2006), proceso que genera calor por la radioactividad de los gases mencionados u otros de tipo efecto invernadero; alcanzando, en un lapso corto, un máximo y luego una disminución drástica de temperatura cuando los esfuerzos de compresión cierran las microfisuras y se corta el flujo de gases hacia la superficie, de este modo se abre paso al suceso sísmico una vez registrada la máxima resistencia de las rocas y se presenta en la superficie una variación en LST como consecuencia de dicha interacción (Freund 2002).

Visto el fenómeno desde el punto de vista de los avances en percepción remota y gracias a la respuesta espectral que genera la interacción de estos gases con la superficie y la atmósfera, es posible estudiar el comportamiento anómalo térmico producto del reajuste tectónico, ya que las imágenes de satélite registran dichas variaciones como emisiones en el TIR que aparecen sobre la tierra y el mar en un radio de unos 100 km alrededor del epicentro. La condición óptima para la detección de estas anomalías se limita a temporadas secas, escenas libres de nubes, zonas de vegetación baja con una larga línea base de observación que permiten y facilitan el procesamiento de datos y un posterior análisis de emisividad como relación entre sismicidad y coberturas (Choudhury *et al.*, 2006; Dimitar *et al.*, 2006). A nivel mundial se han utilizado, según el tipo de imagen satelital, modelos LST que permiten cuantificar la magnitud de cada una de las variaciones involucradas en la anomalía; es decir, cuánta área cubre la anomalía térmica, cuál es el rango de variación en temperatura durante el periodo de estudio y cuándo se registran éstos. De esta forma estudios desarrollados en Europa, Asia, América del Norte y Central revelan datos puntuales de variación en dicha variable cuando se analizan durante eventualidades sísmicas. En la cuenca de Sichuan en China Occidental durante la actividad sísmica en mayo del año 2010, sobre el complejo de fallas geológicas en las Montañas de Longmen, se registraron variaciones térmicas de 4 a 6°C y extensiones perpendiculares al plano de falla principal entre 3 y 6 km (Wenyuan *et al.*, 2012). En febrero de 2005 cerca de la ciudad de Zarand se registró un sismo de magnitud 6.4 Mw cuya variación térmica superficial estuvo entre 5-12°C y cubrió un área de 150000 km² (Saraf *et al.*, 2009); valores similares se registraron en el terremoto de Boumerdes, norte de Argelia en mayo de 2003, cuya magnitud fue de 6.8 Mw (Ouzounov y Freund, 2004). El terremoto de Bam de magnitud 6.6 Mw, ocurrido en diciembre de 2003, registró gran actividad térmica sobre la Placa de Arabia, evidenciando una variación de 8°C por encima de la temperatura habitual y ocupando un área cercana a los 308000 km² (Choudhury *et al.*, 2006).

En su estudio Zhang *et al.* (2010) presentan una variación de 15°C y una cobertura espacial de 200000 km² para el terremoto de Wenchuan de magnitud 8.0 Mw ocurrido en mayo de 2008 y donde se registraron casi 90000 víctimas fatales y grandes pérdidas materiales. Todos estos sucesos registraron sus variaciones máximas de temperatura y cubrimiento espacial de 2 a 5 días antes de que se presentara el suceso sísmico, iniciando el proceso de aumento 15 o hasta 20 días antes del evento y perdurando la

anomalía en la zona desde unos 4 a 10 días después, hasta que la temperatura registró normalidad en cada una de las zonas afectadas.

En el marco regional suramericano, dadas las condiciones geológicas y la dinámica cortical producto de la convergencia entre las Placas Tectónicas de Nazca y Suramérica, se registra una constante actividad sísmica de magnitudes considerables, variante a través de la historia sobre la región de orogénesis Andina; actividad que puede ser estudiada bajo la incorporación de una variable de registro indirecto que permite aplicar modelos LST y establecer si durante los principales terremotos ocurridos en Chile las magnitudes de las variaciones, anteriormente definidas, se catalogan como rangos anómalos asociados a la ocurrencia de estos eventos. Una vez integradas, al proceso metodológico, las características de las diferentes formaciones lito-geológicas y su relación con las diferentes coberturas superficiales presentes en la zona epicentral, se facilitará el análisis comparativo de este fenómeno durante los eventos ocurridos en el país desde una nueva perspectiva, lo cual permitirá conocer los valores de la respuesta térmica regional y presentar una propuesta alterna y complementaria al tratamiento y análisis de información sismológica, hasta hoy inexplorada en el marco suramericano, que contribuya al estudio y comprensión del fenómeno; así mismo a la formulación de metodologías de alertas tempranas que minimicen las pérdidas humanas y económicas asociadas a éstos.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer por medio del análisis y tratamiento de registros térmicos en imágenes satelitales y estaciones climatológicas los cambios térmicos superficiales relacionados con sucesos sísmicos durante los movimientos de reacción por compresión cortical principalmente sobre el sector de la Orogénesis Andina y la costa pacífica suramericana.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar geológica y superficialmente las zonas de estudio y de referencia sísmica, identificando el tipo de coberturas, la tendencia térmica y las características litológicas regionales.

Establecer la relación entre las diferentes estructuras y formaciones geológicas con la magnitud telúrica y la dimensión de la anomalía térmica, frente al comportamiento térmico derivado de la dinámica de las diferentes coberturas presentes en la zona en donde se registra la anomalía en LST.

Validar mediante el uso de archivos de temperatura, registrados en estaciones climatológicas, los resultados obtenidos del procesamiento aplicado a los registros del TIR en imágenes satelitales durante la manifestación de la dinámica cortical, correlacionando los datos térmicos obtenidos del sensor MODIS.

4. JUSTIFICACIÓN

La historia de la humanidad está llena de ejemplos en los que desastres naturales como los terremotos han causado centenares de muertes y millones en daños materiales y que gracias a los avances tecnológicos comienzan a ser mayormente estudiados, monitoreados y comprendidos. Por el momento no se tiene una forma directa de observar las tensiones generadas al interior de la corteza o de detectar cuando alcanzarán niveles críticos; sin embargo, originan señales espaciales y físicas que contribuyen a su comprensión y análisis. Actualmente en la mayoría de zonas de fallas activas se dispone de información sísmica puntual, registrada posterior al evento y orientada al estudio del comportamiento tectónico, aunque puede ser insuficiente para la planificación (Espinosa 2008).

Por esta razón las técnicas de sensoramiento remoto basadas sobre el tratamiento de registros en el rango del TIR y los datos obtenidos en su desarrollo pueden contribuir a proveer la información adicional necesaria para establecer patrones de alerta temprana y mecanismos de monitoreo, a través de tecnología satelital sobre zonas de fallas activas, que favorezca la mitigación de los efectos finales de los movimientos telúricos, ya que el método funciona con datos obtenidos antes y poco después de que en las formaciones geológicas, asociadas a la deformación tectónica, se presente la máxima resistencia a la fractura o liberación de energía, integrando el entorno geográfico con la descripción física del fenómeno y su cobertura espacial.

Estas técnicas son aplicables al manejo de riesgos naturales ya que casi todos los fenómenos geológicos, hidrológicos y atmosféricos son eventos o procesos recurrentes que dejan registros importantes en episodios anteriores. Consecuente con esto, al definir la interacción entre las cubiertas superficiales, la formación y estructura de la columna estratigráfica afectada y la variación térmica en eventos ya sucedidos, la técnica permite identificar áreas expuestas durante la manifestación de la fractura cortical y establecer los picos de la anomalía térmica regional producto de las reacciones de transferencia de calor entre las cubiertas presentes; del mismo modo, presentar información que servirá de referencia para indicar cuándo se alcanzan niveles críticos de estrés cortical en cada región con iguales características geológicas y superficiales, generando una aproximación de cuál sería el tiempo que tarda en presentarse el evento sísmico y las demás propiedades de éste. Dado que se aplica la localización de anomalías térmicas en simultáneo con la temporalidad del sismo, hay que aclarar que éstas no siempre deben tomarse como señales precursoras aunque se observen grandes variaciones térmicas (Kaufman y Tanrd, 1996), lo que significa que aún en las circunstancias más apremiantes también cabe la opción de que no ocurra el esperado movimiento o que el evento no pase de ser un fenómeno menor sin mayores consecuencias.

El método LST tiene algunas limitaciones asociadas al componente climático y atmosférico (Castillo *et al.*, 2009) como la presencia de nubes en las escenas capturadas por los sensores remotos, las distorsiones y alteraciones térmicas implícitas por la dinámica antropológica, los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera superior y la distribución de equipos especializados del registro directo de cambios térmicos superficiales como herramientas de validación. Lo cual hace necesario contar con registros históricos de estaciones meteorológicas durante la etapa de validación e investigación ya que son la única fuente directa confiable para estimar la veracidad de los

rangos de variación en temperatura obtenidos del procesamiento de las imágenes satelitales; o contar con fuentes alternas de validación al desarrollo obtenido.

El desarrollo de este estudio permitirá aplicar los procesos investigativos desarrollados a nivel mundial sobre precursores sísmicos a los procesos de planificación y control necesarios para reducir el impacto social y económico de estos sucesos, haciendo énfasis en el tratamiento térmico como respuesta de la actividad tectónica. Por tal motivo, como principal objetivo, se pretende desarrollar un mecanismo de análisis en el cual se involucren los intervalos máximos de anomalías asociadas al cambio de estrés cortical y/o el aumento de emanaciones de gases o líquidos que alteren el registro de calor superficial, para establecer cuáles son los valores que indiquen cuándo y qué tan rápido se debe reaccionar ante la presencia de un sismo en las regiones sísmicamente activas; generando así, herramientas documentadas que permitan tomar decisiones sobre la manera en que se deben evacuar poblaciones en riesgo dada la magnitud de la anomalía y la posterior ubicación epicentral.

5. MARCO TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN

En esta sección se presenta la base teórica y conceptual de orientación al lector que permitirá una adecuada interpretación y comprensión del tema desarrollado. Los conceptos básicos sobre geología y percepción remota utilizados dan aclaración a los diferentes marcos de explicación teórica y establecen la relación de análisis propuesta en los diferentes casos referenciales del fenómeno térmico en estudio.

5.1. MARCO CONCEPTUAL

5.1.1. Conceptos sobre Percepción Remota

5.1.1.1. *Percepción Remota (Teledetección)*

Ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes y datos relacionados y adquiridos desde plataformas aéreas y satélites que registran la interacción entre la materia y la energía electromagnética.

5.1.1.2. *Radiación Electromagnética*

Combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. La radiación electromagnética puede manifestarse de diversas maneras como energía radiante, luz visible, rayos X o rayos gamma. A diferencia de otros tipos de onda como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío.

5.1.1.3. *Emisividad*

Es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto, debida a una diferencia de temperatura con su entorno. Cuando más caliente es un objeto, más energía infrarroja emitirá. La emisividad puede tener un valor de 0 (espejo brillante, reflector perfecto) a 1.0 (radiador de Planck, emisor perfecto).

5.1.1.4. *Radiancia*

La radiancia de una superficie emisora es el flujo radiante emitido (directamente o por reflexión o transmisión) por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada sobre un plano normal a la dirección en consideración. La radiancia varía con la variación del punto de observación y, al basarse en la dirección, es una magnitud vectorial. Es la magnitud radiométrica más importante porque se conserva con la propagación (a menos que haya absorción o difusión) y además está en relación con la forma de captar la luz del ojo humano y de instrumentos como las cámaras y otros similares.

5.1.1.5. *Reflectancia*

Capacidad de las superficies de reflejar la luz y se define como la relación entre el flujo luminoso reflejado y el flujo luminoso incidente. Así mismo, hace referencia a la cantidad de energía que es reflejada por un objeto luego de que esta incide sobre él. El resto de la energía incidente puede ser transmitida o absorbida por el objeto.

5.1.1.6. *Reflectividad*

La reflectividad mide la relación entre la amplitud del campo electromagnético reflejado respecto a la amplitud del campo incidente. Por lo tanto la magnitud de la reflectancia es el cuadrado de la magnitud de la reflectividad, y se expresa como un número complejo como queda demostrado por las ecuaciones de Fresnel para una capa simple, mientras que la reflectancia es siempre un número real positivo.

5.1.1.7. *Trasmitancia*

Se define como la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en determinada cantidad de tiempo.

5.1.2. Conceptos Geológicos

5.1.2.1. *Corriente de Convección*

La convección es el mecanismo cíclico térmico que se produce en los fluidos cuando el calor es transportado desde zonas con altas temperatura a otras con menor temperatura ocasionando cambios en la densidad de los materiales (Figura 1). La transferencia de energía comienza cuando una porción de materia se calienta y al dilatarse, asciende desde los puntos más calientes a los más fríos. El proceso contrario tiene lugar cuando al enfriarse un material aumenta su densidad y desciende por efecto de la gravedad. Este es el proceso que sucede al interior de la Tierra entre el núcleo y la Litósfera, definiendo corrientes que en la superficie se manifiestan originando geoformas particulares como dorsales, cordilleras y rifts.

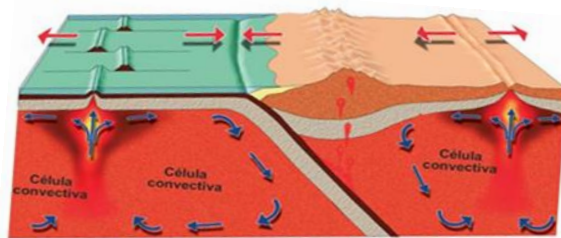


Figura 1. Corrientes de Convección en zonas de subducción provocando orogenia continental

Matus y Novoa, 2006.

5.1.2.2. *Deriva Continental*

La deriva continental es la teoría que sustenta el desplazamiento horizontal y progresivo de las masas continentales, unas respecto a otras. Según esta teoría, el fenómeno del desplazamiento sucede hace millones de años, desde el Paleozoico, gracias a la convección global entre el manto y la parte superior rígida que forma la corteza terrestre, generando que la Litósfera sea reconfigurada y desplazada permanentemente. Este movimiento se debe a que continuamente sale material fundido desde el manto formando corteza oceánica y produciendo una fuerza que empuja estas masas hacia las zonas ocupadas por los continentes (placas continentales) generando la dinámica continental característica de la superficie terrestre.

5.1.2.3. *Tectónica de Placas*

La tectónica de placas es una teoría geológica que explica la forma en que se encuentra estructurada la Litósfera (la porción externa más fría y rígida de la Tierra), indicando los desplazamientos de deriva que se observan entre placas sobre el manto terrestre fluido, sus direcciones e interacciones que dan origen a la formación de las diferentes estructuras montañosas (orogénesis) y la expansión de la corteza oceánica. Así mismo, da una explicación satisfactoria sobre por qué los terremotos y los volcanes se concentran en regiones concretas del planeta (como el cinturón de fuego del Pacífico) o por qué las

grandes fosas submarinas están junto a islas y continentes y no en el centro del océano. La tectónica de placas puede definirse como una teoría compuesta por una gran variedad de ideas que explican el movimiento observado de la capa externa de la Tierra por medio de los mecanismos de subducción y de expansión del fondo oceánico, que, a su vez generan los principales rasgos geológicos de la Tierra, entre ellos los continentes, las montañas y las cuencas oceánicas (Figura 2).

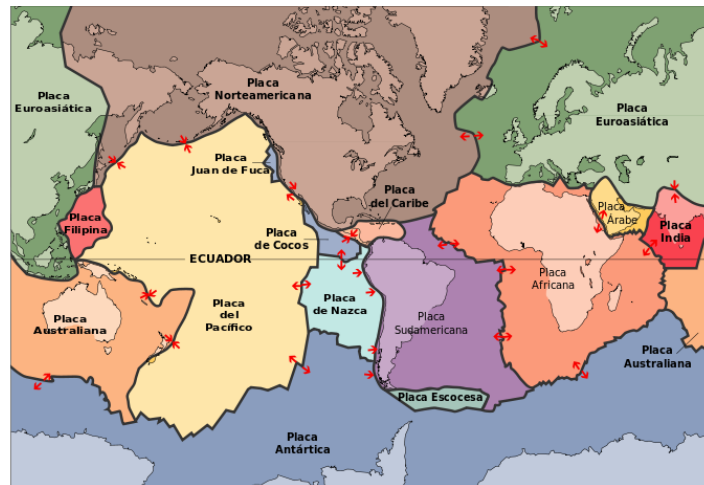


Figura 2. Distribución de Placas Tectónicas

Matus y Novoa, 2006.

5.1.2.4. Zona de Subducción

Las zonas de subducción son bordes convergentes de placas donde la Litósfera desciende (es subducida) hacia la astenósfera (zona superior del manto terrestre). La subducción se produce porque la densidad de la placa litosférica descendente es mayor que la de la astenósfera subyacente. En general, la Litósfera oceánica es más densa que la astenósfera subyacente, mientras que la Litósfera continental es menos densa y resiste la subducción, por consiguiente la Litósfera cubierta por corteza oceánica es la que siempre experimenta la subducción (Figura 1).

5.1.2.5. Unidad Morfoestructural

Son las formas y la disposición interna que adopta el relieve, siendo el resultado de los movimientos tectónicos procedentes del interior de la tierra que originan desplazamientos, levantamientos y hundimientos de la corteza terrestre y crean la disposición básica del relieve.

5.1.2.6. Falla Geológica

En geología, una falla es una discontinuidad que se forma por fractura en las rocas de la corteza terrestre (Figura 3), a lo largo de la cual ha habido movimiento de uno de los lados respecto del otro. Las fallas se forman por esfuerzos tectónicos actuantes en la corteza. La zona de ruptura tiene una superficie generalmente bien definida denominada plano de falla. El fallamiento (o formación de fallas) es uno de los procesos geológicos fundamentales asociados a la Orogénia. Asimismo, los bordes de las placas tectónicas están formados por fallas de hasta miles de kilómetros de longitud.

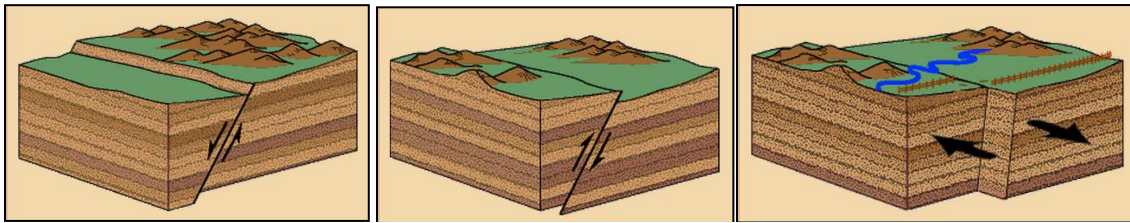


Figura 3. Tipos de Fallas Geológicas: Normal, Inversa, de Rumbo (izquierda-derecha).

Delanoy 2010.

5.1.2.7. **Sismo o Movimiento Telúrico**

Un seísmo o sismo es un fenómeno de sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre producido por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas. Los más comunes se producen por la ruptura de grandes estructuras geológicas en zonas de fallas geológicas activas. También pueden ocurrir por otras causas como la fricción en el borde de placas tectónicas, procesos volcánicos o incluso ser producidos por el hombre al realizar pruebas de detonaciones nucleares subterráneas. El punto de origen de un terremoto se denomina hipocentro y el epicentro es el punto de proyección del hipocentro en la superficie terrestre. Dependiendo de su intensidad y origen, un sismo puede causar desplazamientos de la corteza terrestre, corrimientos de tierras, tsunamis o actividad volcánica. Para la medición de la energía liberada por un terremoto se emplean diversas escalas entre las que la escala de Richter es la más conocida y utilizada en los medios de comunicación. Epicentral: referente al epicentro.

5.1.2.8. **Roca Intrusiva**

También llamadas rocas plutónicas, se forman de magma solidificado en grandes masas en el interior de la corteza terrestre. El magma, rodeado de rocas preexistentes (conocidas como rocas caja), se enfría lentamente, lo que permite que los minerales formen cristales grandes, visibles a simple vista, por lo que son rocas de "grano grueso". Tal es el caso del granito o el pórfido. Las intrusiones magmáticas a partir de las cuales se forman las rocas plutónicas se denominan plutones, como por ejemplo los batolitos, los lacolitos, los sills y los diques. Estas rocas solo son visibles cuando la corteza asciende y la erosión elimina las rocas que cubren la intrusión. Cuando la masa de rocas queda expuesta se denomina afloramiento. El corazón de las principales cordilleras está formado por rocas plutónicas que cuando afloran, pueden ocupar enormes áreas de la superficie terrestre.

5.1.2.9. **Roca Metamórfica**

Roca formada a partir de otras rocas mediante un proceso llamado metamorfismo. El metamorfismo se da indistintamente en rocas ígneas, rocas sedimentarias u otras rocas metamórficas, cuando éstas quedan sometidas a altas presiones (alrededor de 1500 bar), altas temperaturas (150-200°C) o a un fluido activo que provoca cambios en la composición de la roca, aportando nuevas sustancias a ésta. Al precursor de una roca metamórfica se le llama protolito. Según la textura las rocas metamórficas se clasifican en foliadas (pizarra, esquisto, gneis, etc.) y no foliadas (mármol, cuarcita, serpentinita, canchagua, etc.).

5.1.2.10. **Roca Volcánica**

Roca originada cuando el magma se enfría cerca o sobre la superficie terrestre a temperaturas y presiones bajas; si el enfriamiento es rápido se forman microcristales o granos finos, conformando rocas volcánicas compuestas total o parcialmente de vidrio.

Las rocas volcánicas más comunes en la Tierra son el basalto seguido por la andesita, la riolita, la dacita y la traquita.

5.1.2.11. Roca Sedimentaria

Roca originada a partir de la consolidación de fragmentos de otras rocas, de restos de plantas y animales o de precipitados químicos, conformadas por partículas de diversos tamaños transportadas por el hielo, el agua o el aire y sometidas a procesos físicos y químicos (diagénesis). Se clasifican en detríticas, químicas u orgánicas sobre las cuales actúan los procesos geológicos externos como la meteorización, la erosión, el transporte y la sedimentación.

5.1.2.12. Roca Volcano sedimentaria

Rocas conformadas a partir de flujos volcánicos en donde el material de origen volcánico a medida que avanza puede incorporar material sedimentario. Estos flujos se conocen como oleadas piroclásticas que decantan sobre material en suspensión. No son iguales que las rocas volcánicas, ya que estas son ígneas y de origen lávico.

5.1.2.13. Periodo Geológico

Unidad cronológica formal de la escala temporal geológica que representa el tiempo correspondiente a la duración de un sistema o serie de procesos geológicos y biológicos que ocurrieron en el planeta registrados mediante la formación de estructuras litológicas y procesos geoquímicos. Se caracterizan por presentar cambios mayores en las biotas o aspectos variables de condiciones climáticas y geológicas. A continuación se presentan los periodos geológicos reconocidos dentro de la zona de estudio:

- **Devónico**

Antecede al Carbonífero y comenzó hace 416 ± 2.8 millones de años; en este período se produjeron importantes innovaciones en la biota terrestre, destacando la primera expansión generalizada sobre los continentes de la vida, que hasta entonces sólo tenía una presencia importante en los mares. La expansión de las plantas terrestres contribuyó, junto a la continentalización y la elevación orogénica, a un progresivo enfriamiento del clima, que produjo la crisis de extinción que marca el final del período. Hacia el final del Devónico aparecieron los primeros bosques cuando las plantas con tallo desarrollaron estructuras fuertes y leñosas capaces de soportar ramas y hojas elevadas. Algunos árboles del Devónico se sabe que alcanzaban los 30 metros de alto. Al final del período también habían aparecido los primeros helechos, colas de caballo y plantas con semilla.

- **Carbonífero**

Es el quinto período del Paleozoico y data de hace 360 a 300 millones de años. En esta etapa tienen origen los combustibles fósiles que hoy se emplean como recursos energéticos. El paisaje del Carbonífero era sobretodo vegetal, con abundantes ciénagas y zonas pantanosas de climas húmedo y tropical, permitiendo la proliferación de los bosques pantanosos y ecosistemas tropicales. Los enormes helechos, de hasta 40 metros, cubrían amplias extensiones. Los restos de los bosques carboníferos se acumularon en las aguas pantanosas que con el paso del tiempo, la acción de las bacterias, el calor y la presión de los nuevos sedimentos, transformaron esos restos vegetales en carbón, entre capas de limos y pizarra. Estos efectos sumados a los restos de animales acumulados cerca de las costas facilitaron el aumento y la producción de gases como el Metano y el CO₂.

- **Pérmico**

Sigue al periodo Carbonífero y precede al Triásico, debe su nombre a los extensos yacimientos en la región alrededor de la ciudad de Perm en Rusia. Este periodo comenzó hace 299 millones de años y acabó hace 251 millones de años. Los yacimientos pérmicos consisten principalmente en estratos rojos continentales y exposiciones marinas poco profundas. En el Pérmico hubo importantes cambios climáticos con una tendencia general de climas tropicales a condiciones más secas y áridas. Se produjo una contracción de los pantanos y se extinguió gran cantidad de helechos arborescentes y anfibios que requerían condiciones húmedas. Los glaciares del Carbonífero sobre la región polar del sur de Gondwana retrocedieron durante el Pérmico.

- **Triásico**

Período geológico de la Era Mesozoica, comenzó hace 251 millones de años y acabó hace 199.6 millones de años. El clima del Triásico fue generalmente caluroso y seco, y dio lugar a la formación de desiertos y evaporitas. El gran tamaño del continente de la Pangea limitó el efecto moderador del océano; su clima continental era altamente estacional, con veranos muy calurosos e inviernos muy fríos. Los helechos predominaban en las zonas húmedas y junto con las cicadáceas presentaban una morfología similar a las palmeras y algunos predecesores de los pinos actuales.

- **Jurásico**

Período geológico central de la Era Mesozoica, se extiende desde 206 a 144 millones de años atrás. En este período la Tierra empezó a cambiar y la Pangea da comienzo a su separación en los continentes. Abundó la lluvia y la tierra se cubrió de vegetación, fue el tiempo de apogeo para los dinosaurios. Los bosques del Jurásico temprano estaban poblados de una gran variedad de dinosaurios herbívoros y dinosaurios pequeños. A mediados del jurásico el clima mundial se fue suavizando originando vegetación en gran cantidad y gran variedad de dinosaurios y otros animales.

- **Cretácico**

Es el tercer y último período de la Era Mesozoica, comenzó hace 145.5 ± 4.0 millones de años y terminó hace 65.5 ± 0.3 millones de años. A mediados del Cretácico, se dio la formación de más del 50% de las reservas mundiales de petróleo que se conocen en la actualidad. Los movimientos continentales provocaron el surgimiento de grandes cadenas montañosas submarinas y la elevación del nivel del mar, fenómeno conocido como transgresión. En su punto culminante, aproximadamente la tercera parte de las actuales zonas continentales estaban sumergidas. El clima fue muy cálido ya que no había hielo en los polos.

- **Paleógeno**

Período geológico conocido como el terciario temprano, es una división de la escala temporal geológico que inicia la era Cenozoica; comenzó hace 65.5 millones de años y acabó hace 23.03 millones de años. El período Paleógeno marcó un tiempo de transición en la historia de la Tierra donde el cambio climático más profundo fue el enfriamiento de las regiones polares. En el ámbito global se formaron cadenas montañosas actuales y los sedimentos que registran estos y otros sucesos cenozoicos están, en su mayoría, no consolidados, a excepción de carbonatos y algunos siliciclásticos litificados. El clima era cálido, uniforme y muy húmedo, sin grandes contrastes entre el ecuador y los polos. Los bosques subtropicales llegaban hasta las regiones polares, donde se transformaban en bosques de hoja amplia y caduca desconocidos hoy en día, adaptados a las estaciones de noche perpetua o de día continuo.

- **Neógeno**

Antecede al Cuaternario e inicia hace 23.3 millones de años y es la etapa que trae consigo un clima cálido cambiante a uno más frío que desemboca en una progresiva aridez. Este clima conllevó un cambio en la pluviosidad y en la circulación de la atmósfera. De las modernas características geográficas, sólo falta la formación del puente terrestre entre Suramérica y Norteamérica. Suramérica deriva al oeste, hacia la zona de subducción del Océano Pacífico, provocando tanto el aumento de los Andes como la extensión hacia el sur de la península de Mesoamérica. Depósitos marinos y continentales del Mioceno son comunes en todo el mundo con afloramientos marinos cerca de las costas modernas. El mejor indicador de los cambios climáticos son los cambios evolutivos y de distribución geográfica de las angiospermas. La gran abundancia de plantas herbáceas en este período permitiría llamarlo Edad de las Hierbas. El éxito de plantas herbáceas es el resultado del deterioro climático generalizado que tuvo lugar durante el Oligoceno y Mioceno. El enfriamiento del clima y unas condiciones más secas, ocasionaron la regresión de los bosques y la presencia de plantas herbáceas que prefieren los hábitats abiertos y pueden resistir bajas precipitaciones.

- **Cuaternario**

Es el último de los períodos geológicos y se desarrolla en el Cenozoico desde hace 2.588 millones de años hasta el presente. Los severos cambios climáticos durante los ciclos de glaciaciones tuvieron importantes impactos sobre la fauna y la flora donde cada avance del hielo provocaba que grandes extensiones de los continentes se despoblaran completamente, con plantas y animales retirándose empujados por el avance del frente glaciar. Durante los períodos glaciares las lluvias fueron menos abundantes debido a la disminución de la evaporación del agua de los océanos; por otro lado, debido a esta sequedad del clima, los desiertos serían más extensos y más secos. Los principales efectos de las glaciaciones fueron la erosión y deposición de materiales sobre grandes zonas de los continentes, la modificación de los sistemas fluviales, la creación de millones de lagos, los cambios en el nivel del mar, el desarrollo de lagos pluviales lejos de los márgenes del hielo, los ajustes isostáticos de la corteza y anomalías en los vientos.

5.1.3. Otros Conceptos

5.1.3.1. Anomalía Térmica

Una anomalía térmica se presenta como la variación de temperatura registrada en una zona específica durante eventualidades puntuales de corta o larga duración, donde la variación excede los valores promedios del perfil térmico local por dos a más desviaciones, ocupando grandes regiones (Choudhury *et al.*, 2006).

5.1.3.2. Calor Latente

Es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, ya sea de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización). Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura.

5.1.3.3. Digitalización

Consiste en representar los contornos obtenidos mediante un conjunto de curvas Bezier. Las curvas Bezier son ampliamente utilizadas en computación gráfica debido a que requieren poco espacio de almacenamiento y son independientes de la resolución de

salida que se utilice. Su uso actual se extiende desde la representación de tipografías hasta el modelado de objetos tridimensionales.

5.1.3.4. Ionización

Proceso físico-químico mediante el cual se producen iones, equivalentes a átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso (anión) o falta de electrones (catión) respecto a un átomo o molécula neutra.

5.2. MARCO TEÓRICO

En términos simples, la acción por compresión cortical genera mecanismos de reacción hacia la relajación superficial de la Tierra donde aparecen una serie de factores físicos, químicos y ambientales correlacionados y dirigidos a manifestarse en un solo fenómeno y agrupados en una teoría general conocida como acoplamiento lito-iones-atmosférico (Pulinets y Dunajevka, 2007).

Esta teoría sustenta que un evento sísmico es producto de múltiples movimientos ocasionados por la generación inicial de gases en el manto y que al expandirse provocan corrientes que direccionan grandes masas de magma hacia sectores menos calientes perdiendo densidad y solidificando el material en estructuras específicas que más tarde colisionan y se deforman, evidenciando variaciones en la respuesta térmica superficial bajo la inducción de estrés tectónico. Las siguientes teorías detallan cómo desde el punto de vista geológico las variaciones espaciales en LST logran ser asociadas a eventualidades sísmicas y analizadas mediante su respuesta en el espectro electromagnético. Además se presenta la teoría de correlación térmica que permite conocer el comportamiento térmico en el aire a partir de las tendencias térmicas superficiales, constituyendo el soporte de validación al tratamiento y resultados anómalos en LST.

5.2.1. Teoría de Mecánica de Rocas

En esta teoría se establece que la masa rocosa responde de diferentes formas según la dirección y magnitud de la fuerza aplicada en una estructura geológica específica presentando movimientos de tensión, compresión, fricción, torsión y cizallamiento debido al dinamismo magmático; y donde la aplicación de estrés (cambios de presión) podría ser rápida o lenta, de poco tiempo o prolongada, simple o múltiple, o de una sola vez o repetida, dando lugar a procesos dinámicos al interior de las rocas.

La energía mecánica acumulada en el interior de éstas, inducida por éstas fuerzas, puede ser transformada en otro tipo de energía como la energía de emisión lumino-acústica o la energía térmica generadas por la formación de microfracturas y la fricción entre la superficie de las grietas y granos. Esta transformación hace que la roca sometida a estrés, se deforme elásticamente, plásticamente, o elástica y plásticamente, produciendo variaciones térmicas significativas y cambios en el origen y desarrollo de fracturas en la roca, detectables por los cambios espacio-temporales de la radiación electromagnética emitida por la superficie de la masa involucrada; esto se debe a que los procesos de manifestación inician como reacciones físicas y químicas asociados a la respuesta térmica desde el interior de la roca, incluyendo la ionización y excitación de electrones en la superficie por acumulación y consumo de elementos gaseosos en ambientes húmedos y la conversión de energía en calor.

De esta forma cuando un volumen de roca es sometido a presión litostática se comprime haciendo que las rocas comiencen a combarse y se genere la elevación y plegamiento de la corteza terrestre, generando así la microfracturación de estructuras y la liberación de radón, metano y otros gases ligeros; así como la emersión de fluidos salinos presentes en los poros y la formación películas de agua de contacto intergranular (Freund 2002).

Wu *et al.* (2000) definen la teledetección en mecánica de rocas (*RSRM*, por sus siglas en inglés) como un área de estudio basada en la interpretación y procesamiento remoto de información geo-litológica apoyada en las bondades de la informática, que trata los conceptos físicos y químicos de la radiación electromagnética en materiales rocosos bajo carga, las características de la radiación electromagnética y las leyes de los procesos de ruptura y el colapso de dichos elementos, su microestructura y las aplicaciones a las geociencias y la ingeniería geomecánica, sustentando que el proceso de carga por transferencia de tensión-deformación de la roca debido al agrietamiento podría ser claramente previsto en las imágenes térmicas de infrarrojos.

Con base en los resultados recientes sobre la mecánica de rocas y observaciones geofísicas, Muto (2011) explica los patrones de la actual acumulación de tensión geodésica y la sismicidad superficial donde los conceptos sobre resistencia han permitido predicciones cuantitativas de la fuerza en la Litósfera entre los comportamientos frágiles y plástico de las rocas, estableciendo una serie de parámetros entre los que se destaca el factor térmico inducido por agentes compresivos y de caracterización mineralógica expresados en la ecuación 1.

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n d^{-m} f_{H_2O}^r \exp\left(-\frac{Q + pV}{RT}\right) \quad (1)$$

donde $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación, A una constante del material, σ la tensión diferencial, n el exponente de la tensión en la roca, d es el tamaño del grano, m el exponente de tamaño de grano, f_{H_2O} la fugacidad de agua, r el exponente de fugacidad, Q la energía de activación, p la presión, V el volumen de activación, R la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

Es así como estudios experimentales muestran que cuanto mayor es la resistencia de la roca, mayor es el incremento de temperatura registrada por radiación en el TIR, ya que los fragmentos de roca encandecen, en función de la fuerza aplicada, debido al calentamiento por fricción y la interacción por liberación de gases ligeros en materiales como arenisca, granitos, calizas y mármol blanco u otros con presencia de minerales como acero, hierro, carbón, entre otros. En la Figura 4 se presenta la curva de variación térmica máxima por radiación TIR obtenida experimentalmente bajo el incremento en la magnitud de la fuerza aplicada sobre una muestra de granito, evidenciando que la acumulación de energía mecánica dentro de la muestra por aumento en la fuerza compresiva provoca que más energía electromagnética se irradie y se obtenga más energía térmica a partir de la energía mecánica variante.

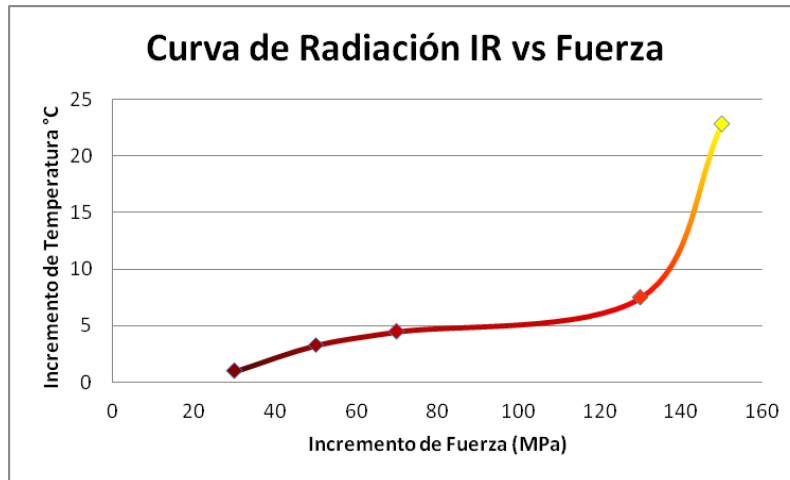


Figura 4. Incremento térmico durante aplicación de fuerzas de compresión sobre una muestra de granito.

Datos expuestos por Wu et al. 2000.

5.2.2. Teoría de Desgasificación

Los principios fundamentales de la migración de gas se refieren a la interacción entre procesos químicos internos de la Tierra y el desarrollo tectónico por inducción geodinámica, donde la migración está estrictamente relacionada con la existencia de fuentes de gas o depósitos de hidrocarburos en cuencas sedimentarias, fluidos geotérmicos en regiones de alto flujo de calor vinculados a los fenómenos magmáticos o metamórficos y la presencia de rutas preferenciales para la desgasificación de tipo horizontal o vertical, atribuyendo al tipo horizontal la intercalación de horizontes de arena dentro de una secuencia arcillosa y al tipo vertical las discontinuidades tectónicas como fallas y redes de fracturas debido a la flotabilidad como medio de propagación, donde se categoriza a estas rutas como las zonas de mayor permeabilidad (Etiope y Martinelli, 2002), demostrado que las emanaciones de radón u otros gases en el área de preparación del terremoto puede producir variaciones significativas en la temperatura del aire y la humedad relativa (Pulinets y Dunajevka, 2007) por medio del cálculo de energía térmica intercambiada (Tank et al., 2008), así como variaciones en LST que posteriormente al evento registran estabilidad sobre los rangos térmicos regionales; condicionadas también por características de la dinámica cortical, la humedad en el aire y la estructura cristalina de los macizos rocosos en estrés (Saraf et al., 2009).

Tank et al. (2008) presenta una relación que al aplicar las leyes de Kirchhoff y Stefan-Boltzmann en la estimación del flujo de calor y la radiación a partir de la temperatura y la emisividad del objeto analizado (suelo) permite cuantificar mediante la ecuación 2 la energía térmica intercambiada desde su interior hacia la atmósfera por efectos de desgasificación.

$$\Delta QG = m_G \times \Delta T_G \times C_G \quad (2)$$

donde m_G representa la masa del gas, ΔT_G es la diferencia entre la temperatura del gas de salida y la temperatura final entre el gas y la superficie sólida, C_G es la capacidad calorífica.

Según (Mörner y Etiope, 2002) los procesos de subducción y metamorfismo, asociados a la interacción entre antiguos depósitos del fondo marino y la dinámica convectiva interna de la Tierra, generan la migración, a través de sistemas de fallas y diaclasas como estructuras de relación directa con la atmósfera, de líquidos y gases libres producidos en el manto superior e inferior debido a los cambios de fase en la materia. La pérdida de rigidez en la Litósfera, donde estos cambios de fase juegan un papel central, implica un nuevo procedimiento de producción y conducción de gases y líquidos dentro de ésta, ya que la permeabilidad de las rocas controla los movimientos por desplazamiento de éstos. Sin embargo, las fallas geológicas, ciertas clases de fracturas y unidades geológicas simplifican las rutas de salida generando mecanismos de advección que varían significativamente las cantidades o tasas de escape de los gases hacia la superficie.

Según (Choudhury *et al.*, 2006) en regiones tectónicamente activas el estrés puede acumularse generando aumentos en LST a medida que aumenta la presión por cargas y la fuga de gases cerca a los sistemas de fallas u otras rutas de escape de calor, afirmando que la desgasificación del subsuelo genera un efecto tipo invernadero alrededor de la región en actividad sísmica y que mediante experimentos de laboratorio se ha mostrado la generación de potenciales de calor y electricidad en la superficie de la roca seca que se somete a grandes cargas de presión, donde el calor es generado especialmente a lo largo de las superficies con curvatura máxima por reacciones químicas, es decir, a los bordes y esquinas de elementos con contenido de factores químicos de reacción corta. En este sentido cuando en la corteza la liberación de energía se presenta en forma de sismo, son los planos de falla las principales estructuras implicadas en la generación de grandes variaciones superficiales térmicas durante la liberación de grandes cantidades de gases y líquidos desde el interior de la Litósfera hacia la superficie, dado que las altas presiones direccionan, sobre éstos planos, los flujos de material hacia condiciones de menor densidad y presión donde la interacción con otras sustancias y el cambio de estado manifiestan el aumento de temperatura como consecuencia de la mezcla de gases en escape sobre las capas superiores generando los procesos de condensación, ionización y evaporación. Sin embargo, durante los procesos de relajación cortical cuando la superficie involucrada alcanza altos niveles de estrés muchas de las grietas se cierran gradualmente y finaliza el proceso de liberación de gases hacia la superficie, provocando un descenso significativo de los niveles térmicos alcanzados durante la desgasificación; por esta razón las variaciones térmicas máximas en la superficie no presentan una correspondencia temporal con la ocurrencia del evento sísmico (Qiang *et al.*, 1997).

En la Figura 5 se presenta la tasa de variación en flujo de CO₂ en el suelo registrada en 2007 en el volcán La Solfatara en Pozzuoli (Italia), donde se logró caracterizar cualitativa y cuantitativamente la fuente de suministro y las rutas de desgasificación, evidenciando la afectación sobre las fallas geológicas y el cráter principal. En este estudio se realizaron más de 300 mediciones de flujo de CO₂ del suelo como objetivo de vigilancia volcánica y se logró indicar la relación entre las tasas de desgasificación en la zona y las rutas de escape de dicho gas (Chiodini *et al.*, 2008).

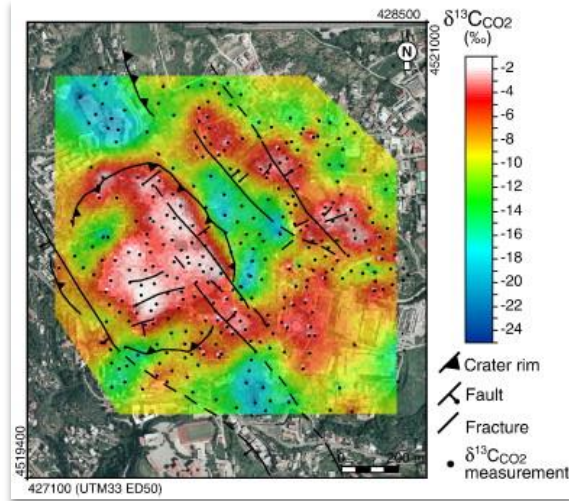


Figura 5. Variación de flujos de CO₂ en el suelo del volcán La Solfarata (Italia), las tonalidades por encima del rojo en la escala representan asociación directa a procesos internos de desgasificación.

Chiodini et al., 2008

5.2.3. Teoría de Ionización del aire y calor latente incidente

Dado que la ionización del aire hace referencia al proceso por el cual las moléculas que están en los gases atmosféricos pierden o ganan electrones, se constituye como el factor inicial a la variación y generación de calor latente cuando la tasa porcentual de estos gases en la atmósfera cambia. Por esta razón los iones producidos en el aire durante la ionización de gases, como el radón, se integran a los centros en las moléculas de agua durante la condensación del vapor, desarrollando mecanismos de hidratación que no requieren saturación y por lo cual durante la transformación de fase para las moléculas se libera el calor latente de evaporación, acrecentando los valores de temperatura y humedad en el suelo y el aire (Das Arulsamy 2011). En este sentido (Pulinets et al., 2006) establecen que el proceso de evaporación del agua por presencia de gases y generación de iones hace que el aire se condense generando la liberación de gran cantidad de calor latente, provocando variaciones en la temperatura superficial del suelo y del aire debido al cambio de fase de la humedad relativa de éste. van Niel et al. (2012) establece que la estimación del flujo de calor latente ($\lambda \epsilon$) en teledetección térmica se calcula por medio de la ecuación 3:

$$\lambda \epsilon(t_*) = \frac{\Delta t * \lambda \bar{\epsilon}_m * S(t_*)}{\Delta t * \bar{S}_m} \quad (3)$$

donde Δt es el número de segundo en el día, $\lambda \bar{\epsilon}_m$ y $\bar{S}_m$ son la evaporación y la energía solar promedio en un mes específico, t_* es el tiempo de normalización asociado al paso del satélite.

En el balance térmico de la atmósfera el calor latente por la evaporación del agua es muy significativo ya que representa un aporte del 48% a tal equilibrio, implicando que cualquier cambio en este contribuye esencialmente a las variaciones de temperatura del aire; de igual manera durante la condensación de agua, el gran número de moléculas se pueden unir a los iones generando un crecimiento de masa hasta un nivel crítico, implicando

variaciones térmicas durante el proceso. Por esta razón las anomalías térmicas observadas dentro de la zona epicentral pocos días antes del evento son interpretadas, por lo general, como aumentos en flujo térmico depositado sobre la corteza terrestre en zonas sísmicamente activas, ya que involucran variaciones de humedad del aire y procesos de formación de aerosoles gaseosos unidos a moléculas de agua.

De esta forma el efecto de la liberación de calor latente asociado a la ionización del aire puede ser dividido en dos partes limitantes y que a la vez facilitan la identificación de anomalías térmicas en zonas de preparación sísmica. La primera es el efecto de la propia agua condensada y la segunda es la reacción generada cuando el agua no se condensa en la gota de agua sino en el ion molecular que tiene el potencial químico diferente del potencial químico de la molécula de agua. Este hecho cambia la velocidad de evaporación/condensación, lo que significa que para el mismo depósito de energía del proceso de evaporación/condensación la reacción puede ser más lenta o más rápida en función del potencial químico y en consecuencia se ven afectados los cambios de humedad del aire debido a la diferencia de potencial químico; es decir, que incluso el menor aumento de la emanación de gases (por lo general, se observa el aumento de 10-20%) puede conducir a cambios significativos en la temperatura del aire durante el periodo de preparación del sismo (Pulinets *et al.*, 2006; Saraf *et al.*, 2009) (Figura 6).

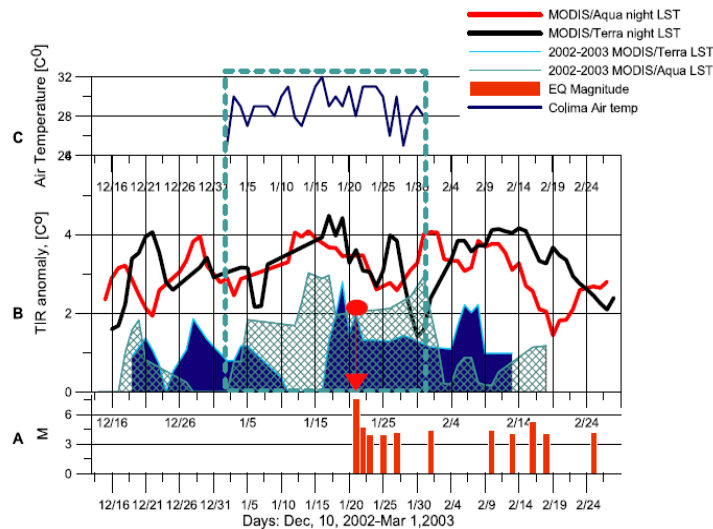


Figura 6. Variación de la actividad sísmica (A) con relación a la variación térmica del aire obtenida de MODIS Terra y Aqua (B) y datos locales de la temperatura (C) en torno al sismo en Colima (México) 7.6 Mw en 22 de enero de 2003.

Ouzounov 2006

5.2.4. Comportamiento Espectral de las Superficies en el TIR

Saraf *et al.* (2009) definen que el campo de infrarrojos en la superficie de la Tierra se genera debido a su temperatura, la cual está constituida por la re-emisión de la parte absorbida de la energía solar y, en menor medida, por los flujos de energía geotérmica donde las propiedades termofísicas de las rocas desempeñan un factor regulador de éste, estimando el balance de calor en la superficie de la Tierra por medio de la ecuación 4.

$$\frac{dT}{dZ} = q_r + q_t + q_{ev} + q_g \quad (4)$$

donde, q_r es el balance de radiación, q_t es la pérdida de calor debido al intercambio turbulento entre la atmósfera y la superficie del suelo, q_{ev} es la pérdida de calor debido a la evaporación, q_g es el flujo de energía geotérmica y Z es la profundidad.

Raissouni y Sobrino (2000) han señalado que la detección remota permite acceder a las magnitudes del equilibrio en el balance de energía térmica, mediante mediciones radiométricas relacionadas con la humedad de la superficie y los suelos desnudos de una manera relativamente simple. Los trabajos más frecuentes han versado sobre la medida de la temperatura de la superficie mediante registros en el infrarrojo térmico, donde éstas medidas se combinan con las de reflectividad y radiancia, proporcionando información importante sobre las características de la vegetación (estructura foliar, albedo, etc.). Se sabe por la ley de Planck, que todo objeto cuya temperatura esté por encima de cero absoluto emite radiación electromagnética de longitud de onda entre 10^{-10} m a 10^{14} micras, incluyendo la onda del infrarrojo medio (1.5-6 micras) y el infrarrojo lejano (6-15 micras) que tienen un efecto térmico (Figura 7).

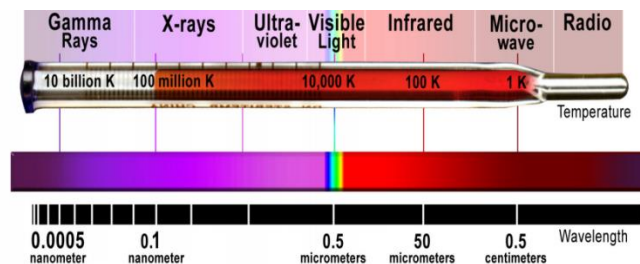


Figura 7. Espectro Electromagnético.

Enders *et al.*, 2007.

Se establece que la radiación electromagnética está constituida por ondas conformadas por componentes eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí, que se propagan en el espacio a la velocidad de la luz (c) y que cuando incide radiación electromagnética sobre una muestra material, ésta puede ser absorbida, generalmente de forma parcial, transformándose en muchas ocasiones en energía térmica. Sin embargo en otras ocasiones, parte de la radiación puede ser dispersada o remitida, con o sin cambio en la longitud de onda. Incluso es posible que, como consecuencia de la interacción, se origine simplemente un cambio en las propiedades de la radiación sin necesidad de producirse absorción y emisión. Por otra parte, se ha demostrado que la muestra puede emitir radiación electromagnética si se la excita bajo determinadas condiciones (Wu *et al.*, 2000).

Cuando la materia interacciona con energía térmica o electromagnética los átomos y moléculas pueden pasar a un estado activo en el que permanecen durante un lapso muy corto, regresando posteriormente a su estado fundamental y cediendo la energía absorbida en forma de energía calorífica a su entorno o re-emitiéndola en forma de fotones de la misma o similar característica, explicando de esta forma la variación térmica, inducida por cambios de energía o frecuencia de vibración y rotación de los enlaces en las moléculas, registrada por configuraciones específicas de energía correspondientes al infrarrojo (Pulinets *et al.*, 2006).

La información cualitativa y estructural que se obtiene con este tipo de espectros permite especificar que el comportamiento térmico de un objeto se puede detectar en el grupo de las ondas electromagnéticas comprendidas entre 8-14 μ m, según la respuesta de calor

procedente de las distintas cubiertas que relacionan parámetros básicos como la Emisividad (e), la Capacidad Térmica (C), la Difusividad Térmica (k), la Conductividad Térmica (K), la Inercia Térmica (P) y el Índice de Calentamiento; todos controlados por factores tales como el contenido de agua, la composición química, la estructura y la rugosidad superficial (Weng 2009).

De esta forma se entiende que la emisión es un proceso diferente a la reflectancia debido a la naturaleza de la onda electromagnética y su dinámica con los objetos, lo cual permite definir la emisión o temperatura como el valor de emisividad equivalente a la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura (Castro 2009). La emisividad, sin embargo, posee características compartidas con la reflectancia como longitud de onda y dirección de emisión, debido a esta última los ángulos de emisión aportan significancia a las estimaciones de modelos de superficie.

Con base en esto, la temperatura superficial (LST) puede ser estudiada utilizando sensores que miden el flujo radiante emitido en longitudes de onda en el infrarrojo térmico entre la superficie terrestre y la atmósfera; haciendo necesario, para calcular la LST de cada cubierta, conocer la emisividad de dicha superficie, así como la transmisividad y la radiancia de la atmósfera para la longitud de onda en la que funciona el sensor (Brasa 1997). De esta forma la estimación de LST usando sensores pasivos como MODIS, Landsat, entre otros que sólo registran la radiación del Sol, se consigue una vez separados dos tipos de datos recibidos por el sensor: la reflectancia de la superficie y la emisividad. En consecuencia el cálculo de la temperatura de la superficie depende de las diferencias cuantificables entre la radiación emitida por los cuerpos y la emisión del Sol. A partir de esto, la física logra calcular y establecer dichas variaciones partiendo de la Ley de Planck formulada en 1914, donde se indica la relación de emisión espectral como cuerpo negro, especificando que dicha intensidad de energía es independiente de la naturaleza del cuerpo y por ende función exclusiva de la temperatura y de la longitud de onda en la que se emite. Esta energía emitida se constituye por medio de la Ley de Stefan-Boltzmann.

Por otra parte la temperatura de la superficie observada desde una plataforma satelital o aérea depende del ángulo de incidencia del Sol y del ángulo de visión del sensor; quedando la estimación de LST en función del tipo de vegetación y su estructura, de la variación e intercambios de flujos de calor latente y sensible entre la vegetación y la atmósfera, limitándose, principalmente, en los métodos estadísticos y matemáticos sobre el procesamiento de los datos de las imágenes satelitales (Choudhury *et al.*, 2006). Es por esto que se han generado metodologías para la estimación de la temperatura superficial teniendo en cuenta diferentes tipos de correcciones en las temáticas de efectos atmosféricos, angulares y de emisividad. Estos desarrollos y registros espectrales permiten indicar que un suelo desnudo encontrará más fácil tanto la absorción como la radiación de la onda térmica, mientras que un suelo con alta cobertura vegetal encontrará más difícil la absorción como la radiación de la onda térmica (Castro 2009); estableciendo además que la variación superficial térmica en la arena seca tiende a ser menor que la encontrada para arenas que contienen agua y que cuando una superficie contiene un porcentaje determinado de humedad la variación térmica alcanza mayor respuesta espectral y térmica en menor tiempo, permitiendo evidenciar características a profundidades específicas (Deans *et al.*, 2006).

5.2.5. Correlación entre las tendencias térmicas del aire y el suelo

En su investigación Castro (2009) presenta un modelo matemático que a partir de la relación entre variables y condiciones ambientales superficiales estima la temperatura del aire mediante la utilización de productos MODIS con $\pm 1^\circ\text{C}$ de precisión. Este modelo usa parámetros de orientación y ubicación solar y satelital, índices de vegetación y el producto térmico superficial (LST) obtenido mediante la utilización de la ecuación 9, un parámetro estadístico de medianas a partir de los datos analizados y un coeficiente de linealidad que permiten inferir la dependencia entre el comportamiento térmico registrado en el aire como influencia de cambios térmicos superficiales condicionados por la estructura y estado de la vegetación e indica que dicha dependencia presenta un alto grado de correlación espacio-temporal. El modelo que plantea Castro (2009) permite calcular la temperatura del aire en la estación climatológica a dos metros de altura (T_{EST}) respecto al nivel del suelo; este modelo se valida mediante la comparación de 590 registro T_{EST} y T_{LST} obteniendo un nivel de confianza del 90% para una muestra de 133 datos y se presenta según la ecuación 5.

$$T_{EST} = 1.0955745 + 0.4135364 * T_{LST} + 0.0003938 * SZ + 0.0503824 * FPAR - 0.007459 * PSNNET - 0.000448 * EVI + 0.003703 * SZA + 0.0757512 * MC \quad (5)$$

donde T_{LST} es la temperatura superficial del suelo obtenida del procesamiento en datos del producto MOD11A1, SZ es el Ángulo Cenital del sensor, $FPAR$ es Fracción de Radiación Activa Fotosintética, $PSNNET$ es la Fotosíntesis Neta, EVI es el índice de vegetación mejorado, SZA es el Ángulo Cenital del Sol y MC es la mediana estadística de la muestra de datos.

En la Figura 8 se presentan los resultados del procesamiento de imágenes satelitales con contenido térmico superficial generado por Castro (2009). La Figura 8(a) contiene el registro LST original y la Figura 8(b) presenta el resultado de estimación y mejoramiento de la temperatura del aire en el sector de orogénesis Andina y los Llanos Orientales en Colombia

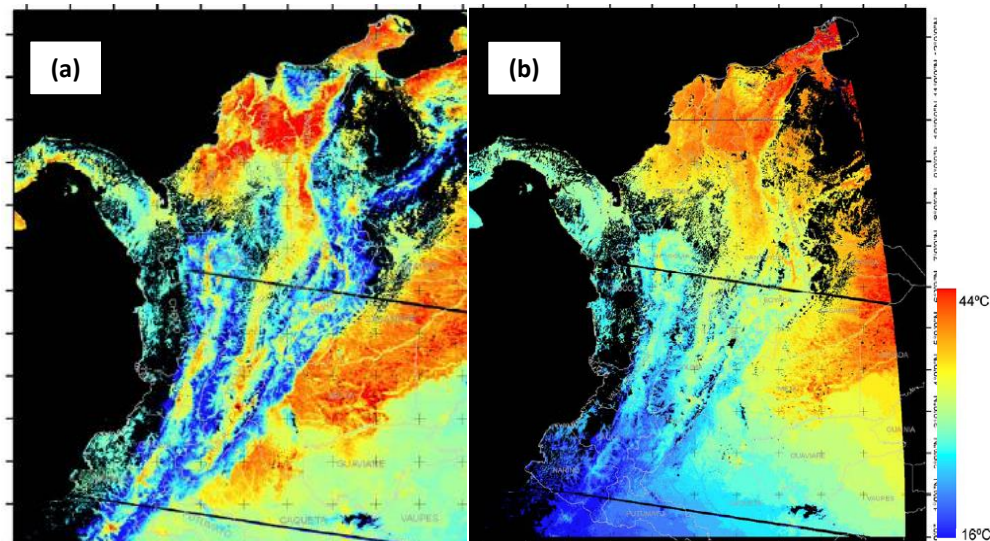


Figura 8. (a) registro LST obtenido del producto MOD11A1, (b) producto de estimación de temperatura del aire mediante el desarrollo del modelo T_{EST}

Castro 2009

Esta teoría constituye el marco de apoyo y partida para la utilización de los datos térmicos de estaciones climatológicas en los procesos de caracterización y validación de tendencias térmicas obtenidas en el desarrollo de este proyecto.

5.3. MARCO REFERENCIAL

En su trabajo Choudhury *et al.* (2006) ubican la zona de estudio sobre la Placa de Arabia que converge hacia la Placa Euroasiática e incluye a Arabia Saudita, el Golfo Pérsico y el Monte Zagros, donde se desarrolla el análisis de dos eventualidades con diferentes ubicaciones y épocas; la primera hace referencia al sismo ocurrido el 26 de diciembre de 2003 con magnitud 6,6 Mw sobre la provincia de Bamy el segundo sobre la ciudad de Zarand en la provincia de Kerman con datos del movimiento registrado el 22 de febrero 2005 de magnitud 6.4 Mw. El análisis térmico fue realizado mediante imágenes del satélite NOAA y se utilizó el canal 4 del sensor AVHRR para calcular la LST del área de estudio y presentar mapas preparados en función del conjunto de datos de la serie de captura diurna y nocturna (D/N), especificando en cada fecha el rango de temperaturas máximas en el día y la noche y un enmascarado que permitió aislar las zonas cubiertas de nubes.

Para el sismo en Bam el aumento de temperatura del suelo se registró entre 5-7°C, y en algunos lugares de 6-10°C por encima del perfil térmico habitual registrado en el mismo período del año para años anteriores. La región anómala en los datos nocturnos del 21 de diciembre 2003 ocupó un área cercana a 308000 km² y en el mapa LST diurno del 24 de diciembre 2003 cubrió un área aproximada de 328200 km²; para tener una referencia de tal cobertura el área que ocupa la provincia de Kerman es de 181714 km². Los mapas generados desde los datos NOAA-AVHRR (D/N) para la LST en el terremoto de Bam mostraron que definitivamente había una anomalía térmica en esa región (Figura 9).

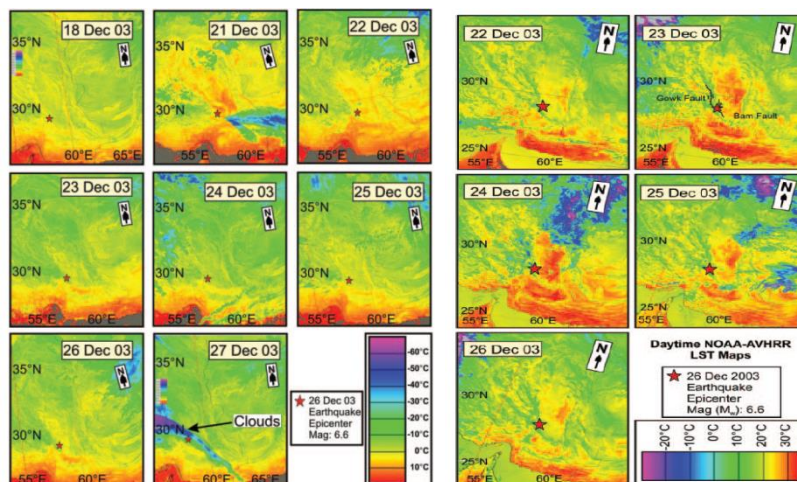


Figura 9. (Izquierda) Series de tiempo LST noche en Bam antes y después del terremoto del 26 de diciembre de 2003. (Derecha) Series de tiempo LST día. Una anomalía térmica intensa se puede ver el 24 de diciembre de 2003, 2 días antes del terremoto.

Choudhury *et al.*, 2006

Los datos de temperatura del aire del año 2005 en los meses de febrero y marzo son recogidos de 21 estaciones meteorológicas y facilitados por la entidad encargada para la posterior generación de curvas de variación térmica requeridas en el proceso de análisis de resultados espectrales. Para el sismo en Zarand la anomalía fue aumentando

gradualmente hasta el 21 de febrero, éste día la temperatura fue más alta y se registró alrededor de 10-12°C por encima de la habitual con una superficie anómala aproximada de 75600 km²; sin embargo, un día después del evento principal la temperatura registrada estaba entre datos de un rango normal (Figura 10).

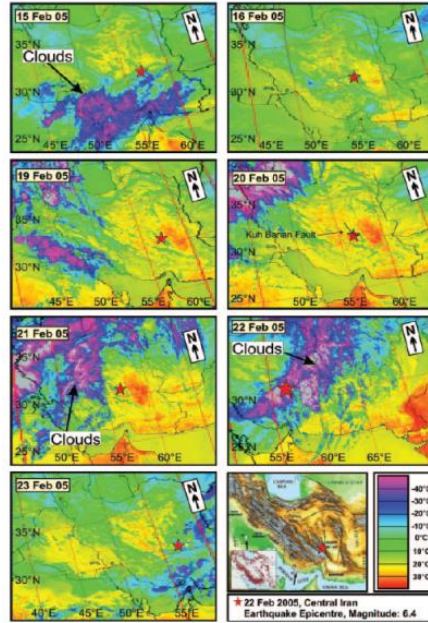


Figura 10. Mapa LST a partir de registros día NOAA-AVHRR antes y después del sismo en Dahoeieh-Zarand del febrero 22 de 2005. El 21 de febrero de 2005 en la anomalía de temperatura se registró la variación máxima.

Choudhury et al., 2006

Este último sismo también es estudiado por Saraf et al. (2009), quienes analizan el evento mediante el tratamiento a imágenes satelitales NOAA y toman como principales parámetros que definen las condiciones de generación de señal IR a la emisividad de la superficie (ϵ), el albedo (A) y las propiedades termo-físicas de las rocas; el contenido de humedad en el suelo y la humedad en el aire también se establecieron como factores importantes que controlan la temperatura de la superficie, enfatizando que éstos procesos influyen en otros como la evaporación y la condensación de humedad que conducen a la presencia de variaciones de temperatura en la superficie.

De acuerdo a lo propuesto por los autores antes citados, la LST (°K) puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:

$$LST = T_4 + (2 + 0.28W)(T_4 - T_5) - 0.4 + 0.48W + (53 - 4W)(1 - \epsilon) + (149 - 26W)\Delta\epsilon \quad (6)$$

donde T_4 y T_5 , medidas en °K, son las temperaturas radiométricas provenientes de los canales 4 (10,3-11,3 μm) y 5 (11,5-12,5 μm) del sensor AVHRR, obtenidas bajo la hipótesis de que la superficie terrestre emite como cuerpo negro, y de la inexistencia de atmósfera entre la superficie observada y el sensor, W corresponde al contenido en vapor de agua existente en la atmósfera, ϵ representa la emisividad media, la cual es estimada como el promedio simple de las emisividades de los canales 4 (ϵ_4) y 5 (ϵ_5), y $\Delta\epsilon$ representa la variación espectral ($\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$). Tanto ϵ como $\Delta\epsilon$ son cantidades adimensionales.

Este estudio permitió identificar un aumento de la temperatura radiante con variaciones de 5-12°C sobre la región de Zarand, localizando el orden máximo de esta expresión anómala días antes del evento y una posterior y continua disminución y normalización térmica poco después del mismo, variación respaldada según datos meteorológicos del momento. Bajo dicho análisis los autores concluyen que la característica de las anomalías TIR, su intensidad y extensión espacial puede variar en cada terremoto y dependen de la magnitud, profundidad focal y las condiciones del terreno. Además, la zona que registra la anomalía térmica es analizada y comparada con un mapa de deformaciones diferenciales de superficie generadas por el radar interferométrico (InSAR), el cual mide los índices de deformación del suelo bajo tensiones corticales y presenta el índice de movimiento del terreno en una escala de colores con precisión vertical de 2mm/año y horizontal de 10m, permitiendo evidencia que dicha zona presento variaciones altitudinales de hasta 15mm (Figura 11).

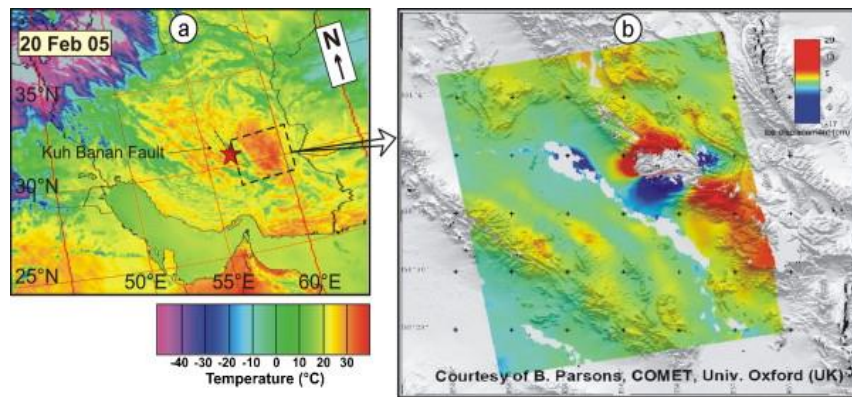


Figura 11. Comparación de anomalía térmica en terremoto del 22 de febrero de 2005 derivado NOAA-AVHRR (a), con el mapa de la deformación InSAR (b) generado por el movimiento en Zarand.

Saraf et al., 2009

Zhang et al. (2010), plantean que el Mecanismo de Origen Básico o “Efecto Desgasificación-invernadero de la Tierra” tiene la característica de relacionar la estructura regional activa y el entorno geológico como razón fundamental del rápido aumento térmico por la acumulación de tensión regional y liberación de gases como el dióxido de carbono, el metano, el vapor de agua, etc.; y proponen un método de procesamiento diferente sobre datos del infrarrojo por teledetección para la estimación de LST utilizando el satélite Chino Meteorológico Geoestacionario FY-2C con base en el cambio en la temperatura de brillo ($B_{v,T}$) durante el periodo correspondiente al terremoto en Wenchuan de magnitud 8.0 Mw en el 2008. Este satélite brinda los parámetros necesarios para la ejecución y análisis del evento ya que presenta una resolución espacial de 1 km con una frecuencia temporal de 30 minutos, permitiendo una comparabilidad alta para la zona de estudio. Los métodos de procesamiento de datos utilizados contemplan la implementación de la Transformada Wavelet y la Transformada de Fourier a la ecuación 7.

$$B(v, T) = 2hc^2v^3(e^{\frac{chv}{kT}} - 1)^{-1} \quad (7)$$

donde $B(v, T)$ es la emitancia de radiación espectral ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$) para número de onda v (cm^{-1}) y la temperatura $T(^{\circ}K)$, h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, k es la constante de Boltzmann.

Esto permite obtener un modelo lógico y confiable semejante de LST ya que inicialmente se realiza la calibración radiométrica y la corrección geométrica de los datos de onda infrarroja para obtener la radiación de longitud de onda en el rango del térmico correspondiente a radiación de cuerpo negro, $BT(^{\circ}K)$. Para evitar la influencia de la radiación solar se eligen los datos de observación de la media noche en hora local, usando el método espectral de potencia se obtiene la frecuencia dominante y el valor de amplitud pico a pico entre datos térmicos. El perfil de tiempo-frecuencia fue hecho a lo largo de la latitud, con intervalo de 1° de longitud para encontrar frecuencia, fecha y ubicación de los parámetros de la región correspondiente a los cambios de amplitud térmica.

Las anomalías observadas aparecieron el 25 de abril sobre la falla de Longmenshan entre la meseta del Tíbet y la cuenca Sichuan y alcanzaron un rango de variación anómala de $9-13^{\circ}C$, sobre una zona que presento un aumento considerable en emanaciones de gases (Figura 12). La longitud de ruptura de la falla del terremoto está cercana a los 300 km donde se distribuyeron principalmente las anomalías térmicas, con aumento en la presencia de gas natural. El periodo típico de la anomalía es de aproximadamente 15 días, el terremoto se produjo a los 11 días después de que el valor máximo en el espectro de potencia de brillo aumentó de 30 hasta 40 unidades.

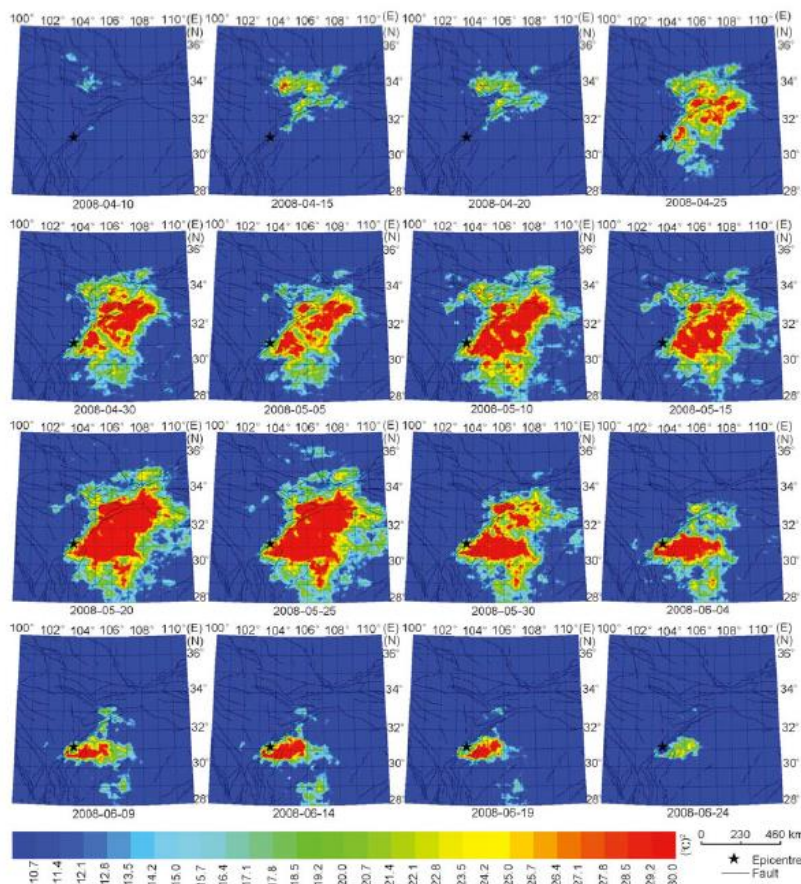


Figura 12. Periodos anormales y evolución del espectro de potencia de la temperatura de brillo para el terremoto de Wenchuan 8.0 Mw en 2008.

Zhang et al., 2010

Tronin *et al.* (2004), en su estudio desarrollan un conjunto amplio de observaciones geoquímicas y meteorológicas en la península de Kamchatka en el Lejano Oriente, Rusia, la cual se caracteriza por su alta sismicidad, actividad volcánica, variación constante en los campos geotérmicos, géiseres y las adversas condiciones climáticas. Este conjunto de datos se amplió con observaciones satelitales térmicas apoyado en análisis de datos históricos que también apuntan a una desviación de la temperatura del aire relacionada con los terremotos, permitiendo analizar parámetros como: la velocidad de flujo de agua (Q_w), valor de temperatura del agua (T_w), contenido de iones y el contenido de gas junto con la temperatura del aire (T_a) y la presión atmosférica (P_a).

Las observaciones se basaron en imágenes de satélite NOAA para las cuales se incluyen los procedimientos estándar para el sensor (AVHRR) en el infrarrojo térmico, realizando correcciones de datos de extracción, calibración, radiación y atmosférica mediante algoritmo de Bekker aplicado a las bandas 4 y 5 para la extracción de LST teniendo en cuenta la emisividad de la superficie y el procesamiento de imágenes registradas durante la noche. Se analizaron cuatro períodos de observaciones del terremoto, seleccionados en función de las condiciones climáticas, la localización del terremoto, la profundidad, la magnitud y la baja accesibilidad de los datos. Dentro del conjunto de eventos analizados el terremoto del 20 de junio de 1996 tenía la mayor magnitud, la Figura 13 muestra una anomalía térmica el 17 de junio, la cual cubrió gran parte de la península presentando una forma inusual y una intensidad positiva de hasta 5°C.

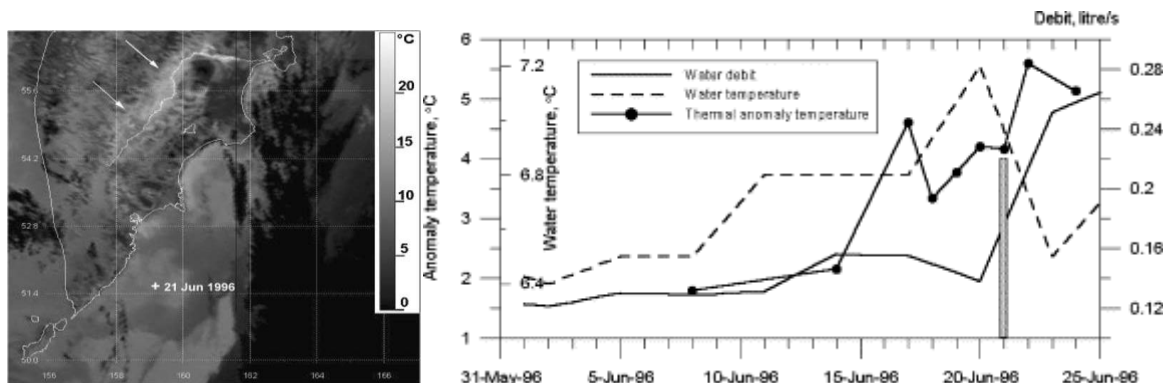


Figura 13. Observaciones de la respuesta térmica anómala en el terremoto del 21 de junio de 1996 en Kamchatka

Tronin *et al.*, 2004

En este estudio se determinó que las observaciones nocturnas de temperatura mostraron una correlación máxima con la actividad sísmica, registrando un aumento de la temperatura del aire desde ± 10 días en torno a los fuertes impactos, con una amplitud de la anomalía de aproximadamente 3.4°C, las anomalías térmicas aparecieron alrededor de 4 a 7 días antes y continuaron unos días después del terremoto, anotando que la anomalía fue sensible a los terremotos con una magnitud superior a 6 y que para distancias de hasta 500 km no hay reacción de los terremotos profundos.

Wenyuan *et al.* (2012), centran su investigación en la zona occidental de la Cuenca de Sichuan, China; utilizando datos del satélite Landsat registrados durante la semana del 19 de febrero de 2003 y destacando la banda 6, dado que contiene información no sólo acerca de la influencia geológica, sino también de radiación con una emisividad diferente. Para el cálculo de la temperatura superficial se aplica el siguiente algoritmo (ecuación 8) sobre emisividad después de hacer las correcciones atmosférica y topográfica:

$$LST = \frac{T_b}{1 + (\lambda * T_b / \rho) \ln \epsilon} \quad (8)$$

donde T_b es la temperatura de brillo en grados Kelvin y se puede conseguir por el método universal (Landsat Project Science Office, 2002), λ es la longitud de onda de la radiación emitida, en este caso $\lambda=11.5$ micras; $\rho=h \times c / \sigma (1.438 \times 10^{-2} \text{mK})$, σ es la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$), h es la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$), y c es la velocidad de la luz, ϵ representa la emisividad de la superficie del suelo calculado por el NDVI. Además se calculan otros índices como el Índice Diferencial Normalizado Modificado del agua (MNDWI) y el Índice Normalizado Urbano (NDBI) para clasificar y eliminar otros tipos de coberturas influyentes en los resultados.

El resultado muestra que la mayoría de los errores entre LST y las temperaturas meteorológicas están en el rango de $0.82\text{-}1.05^\circ\text{K}$ en las zonas de Faubourg y que la anomalía ocupa zonas aledañas a la línea de fallas con aumentos de $4\text{-}5^\circ\text{C}$ (Figura 14), encontrando 4 crestas de temperatura con los picos ubicados en los planos de inmersión de las fallas, con un ancho entre 3-6 km.

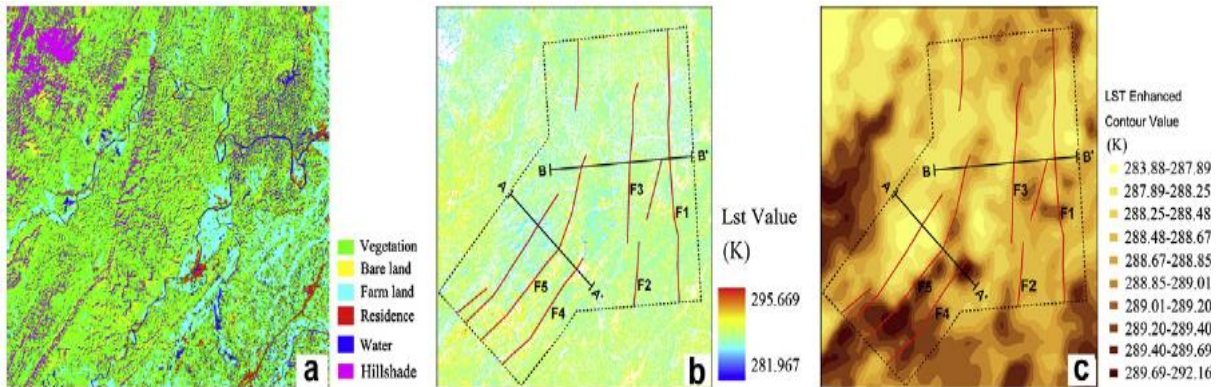


Figura 14. (a) Mapa clasificado de cobertura de la tierra. (b) Mapa LST después de la corrección topográfica y atmosférica, sin alteración, de las regiones cubiertas por la temperatura más baja y más alta. (c) el mejor mapa LST de contorno mediante la interpolación de fragmentos.

Wenyuan et al., 2012

Dimitar et al. (2006) usando datos (LST/E) del producto MOD11A1 de los sensores MODIS por más de 90 días sobre las emisiones diurnas y nocturnas de la superficie de la Tierra, analizaron la temperatura superficial mediante la relación de emisividad (canales TIR 31/32) correlacionando la dinámica atmosférica y las variaciones de la superficie de la Tierra antes de los grandes eventos sísmicos registrados en Bhuj (2001) y Boumerdes (2003). Los datos térmicos en el producto MOD11A1 son extraídos y convertidos a datos reales en grados centígrados mediante la ecuación 9:

$$LST_c = [B1 * f_{esc}] + EKC \quad (9)$$

donde LST_c representa el valor de temperatura superficial del suelo en grados Celsius, B1 es la banda del producto MOD11A1 que contiene los valores LST diurnos, f_{esc} representa el factor de escala (0.02) que trasforma los valores IFOV en el histograma a valores Kelvin y EKC es el factor (-273.15) que convierte valores Kelvin a Celsius.

El terremoto de Bhuj (India) ocurrido el 26 de enero de 2001 con magnitud 7.7 Mw se produjo durante un período de tiempo seco, las observaciones sobre el infrarrojo térmico mostraron una anomalía térmica a lo largo de la parte occidental de los lineamientos determinados por la falla principal del sistema Bhuj entre el Graben Kutch donde el 18 de enero se observa el primer aumento LST cerca de la zona epicentral, evidenciando un patrón de anomalías con significación estadística, es decir, una tendencia térmica positiva con un máximo de 4°C en comparación con el dato máximo inmediatamente anterior para el día 21 de enero. La LST promedio durante las noches del 23 al 25 de enero fue regular con tendencia negativa. De esta manera se especifica que la anomalía LST alcanzó su máxima expresión entre el 20 y el 21 enero de 2001, entre 5 a 6 días antes del evento cerca de la principal falla tectónica y se extendió hasta cerca de 200 km de la ubicación del epicentro (Figura 15).

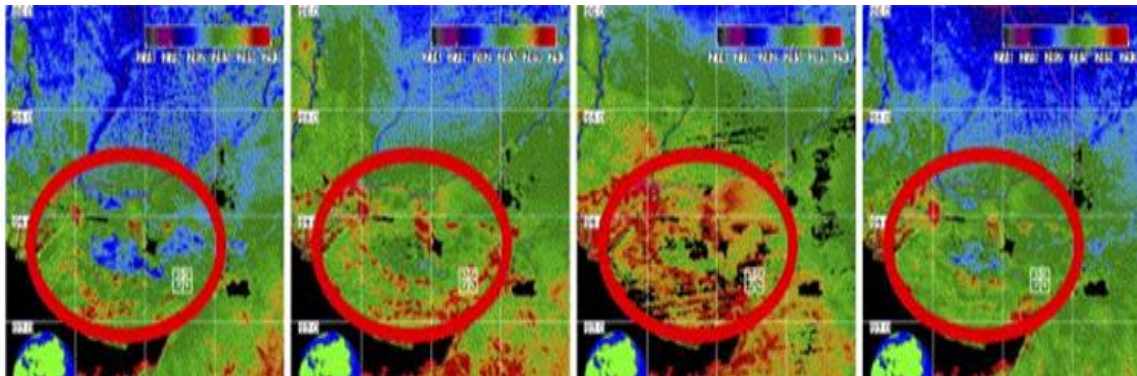


Figura 15. Cobertura térmica anómala durante evento sísmico en Ghuj. Derecha a izquierda: comportamiento térmico en los días 18, 20, 21, 22 de enero de 2001

Dimitar et al., 2006

Para el sismo registrado en Boumerdes el 21 de mayo de 2003 de magnitud 6.8 Mw, con epicentro en el mar al norte de Argelia, se desarrolla la misma técnica de procesamiento de datos aplicada en el sismo de Bhuj. En este caso las temperaturas y tendencias térmicas fueron medidas lejos de la línea de falla para determinar las propiedades de la evolución de la anomalía térmica en comparación con la región circundante. Esta técnica reveló temperaturas elevadas y las tendencias de la pendiente de regresión en los días anteriores al evento del 21 de mayo presentaron un aumento máximo el 18 de mayo con respecto a los días anteriores. La variación TIR comenzó el 16/17 de mayo, 4 a 5 días antes del evento y cerca de la principal falla tectónica, con una amplitud térmica de 1.5 veces mayor en comparación con la mayor LST en todo el rango de tiempo. El análisis estadístico confirmó que unos días antes del sismo principal, sobre la línea de costa (Figura 16), brotó agua fría con una temperatura superficial promedio de -2°C en comparación con la temperatura media del fondo; sustentando que una posible explicación a la presencia de anomalías negativas durante maremotos sobre aguas poco profundas (la profundidad del agua <500 m) es producida por la surgencia de agua fría desde el fondo del mar condicionada por una turbulencia caótica provocada por la liberación de gas y la generación de calor desde el fondo del océano y el posterior afloramiento de agua fría en la superficie (Dimitar et al., 2006).

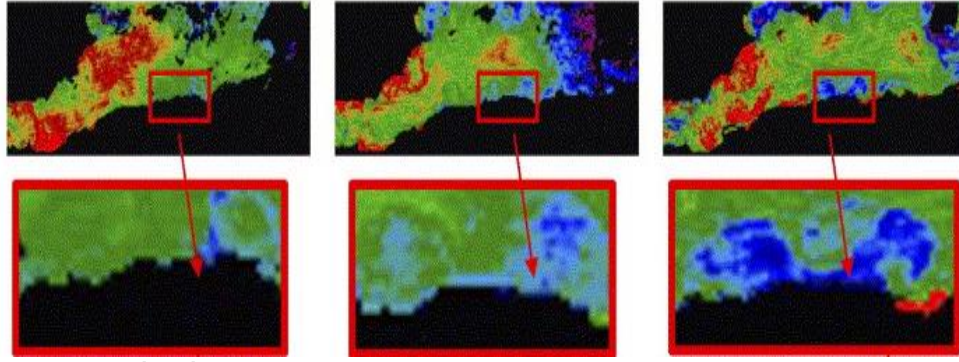


Figura 16. Variación térmica superficial durante sismo de Boumerdes en 2003. (Izquierda-derecha) el 18 de mayo se alcanza el máximo cubrimiento anómalo positivo y el 20 de mayo, un día antes del sismo, se registra el fenómeno de surgencia que afecta el LST sobre la costa.

Dimitar et al., 2006

Un estudio alterno se basa en el análisis de los datos históricos meteorológicos de todo el México en la época del terremoto de Michoacán de magnitud 8.1 Mw y profundidad 15 km ocurrido el 19 de septiembre de 1985 cerca de la ciudad de Cárdenas Lázaro, el epicentro se localizó en el pacífico mexicano y es catalogado como uno de los terremotos más destructivos que afectaron a la Ciudad de México. La variación térmica afectó un área de 14000 km², evidenciando una duración en anomalías térmicas del orden de 2 a 3 semanas con un registro máximo de 16 a 20°C entre 7 a 5 días antes del choque sísmico, con variaciones en parámetros atmosféricos como la disminución de la humedad relativa del aire el 14 y 15 de septiembre (el valor observado de la humedad del aire es más baja durante todo el mes de septiembre), y el aumento de la amplitud térmica diaria hasta valores cercanos a 16°C (Figura 17). El mismo tipo de variaciones se observó hasta una distancia de más de 1000 km desde el epicentro sobre la península de Baja California (Pulinets et al., 2006).

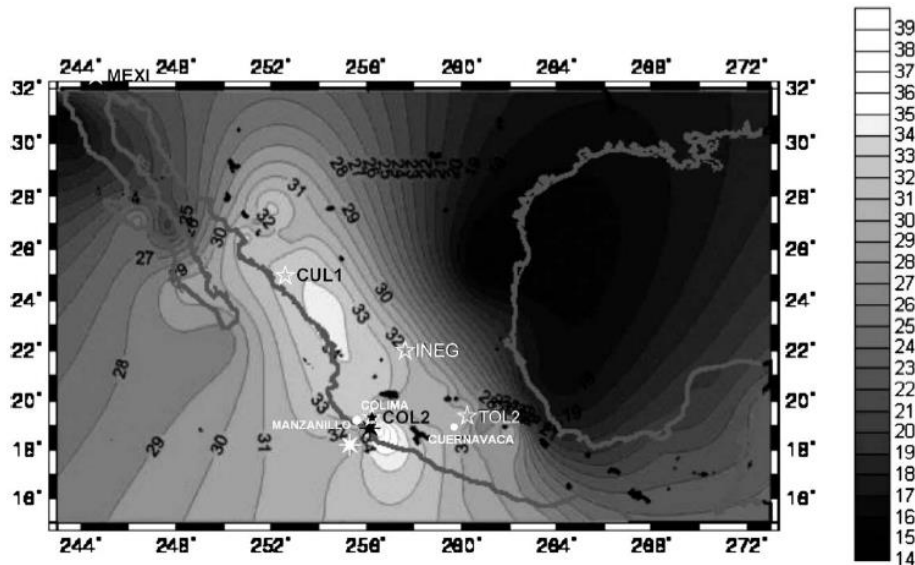


Figura 17. Variación espacial térmica inferida mediante datos de estaciones meteorológicas durante la época del sismo de Michoacán en 1985.

Pulinets et al., 2006

6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Los métodos propuestos por los diferentes autores consultados, principalmente el marco presentado por Dimitar *et al.* (2006), permiten estructurar una secuencia metodológica orientada a identificar el comportamiento en LST partiendo del producto MOD11A1 y la incorporación por caracterización de la región en las variables sísmica, geológica, cobertura superficial y climática y establecer con base en las teorías propuestas (sección Marco Teórico) la relación y dinámica de las tendencias LST con la presencia de determinadas coberturas vegetales y unidades litológicas superficiales en la zona de ocurrencia del evento sísmico durante las fechas próximas de preparación (Figura 18). Esto con el propósito de identificar y ubicar las variaciones anómalas en LST que direccionan e indican el lugar y la proximidad temporal del evento sísmico en una región específica de estudio.

Por consiguiente, el proceso de caracterización regional de variables superficiales abre paso a la intersección y análisis entre éstas respecto a la variabilidad de clases térmicas en las imágenes satelitales que contienen la anomalía LST. La investigación se apoya en el marco teórico de acoplamiento lito-atmosférico, presentando la teoría de desgasificación como el principal factor de influencia en la manifestación superficial por variación térmica de un evento sísmico con inducción de efectos de ionización, resaltando, en el análisis dinámico sobre variaciones en LST, el papel y significación de la variable geológica en los aspectos de edad y tipo de formación litológicos donde los mecanismos de manifestación térmica planteados en la teoría de mecánica de rocas contribuyen significativamente en función de la estructura y características del material afectado. Por último se procede a validar las tendencias térmicas encontradas durante el procesamiento de las imágenes satelitales mediante la correlación de datos registrados en las estaciones climatológicas terrestres para corroborar la dinámica espacio-temporal de LST.

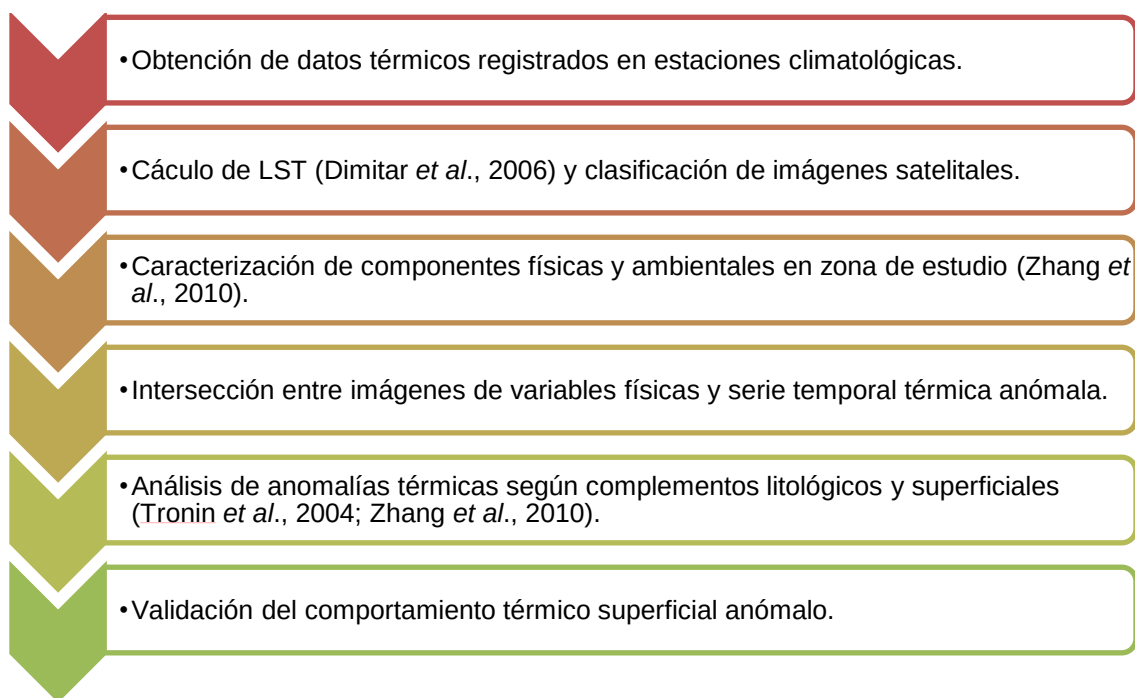


Figura 18. Diagrama metodológico

6.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se selecciona teniendo en cuenta las condiciones teóricas que facilitan la manifestación y respuesta de la anomalía térmica en el TIR para el sismo ocurrido el 27 de febrero de 2010 en la región del Maule (Chile); de esta forma se delimita como región de interés la franja continental que comprende el territorio chileno entre las localidades de Ovalle (Coquimbo) y Valdivia (Los Lagos) con coordenadas geográficas: Latitud 30.053S, Longitud 74.353W (esquina superior izquierda) y Latitud 40.028S, Longitud 68.258W (esquina inferior derecha) contenidas en la Figura 19.

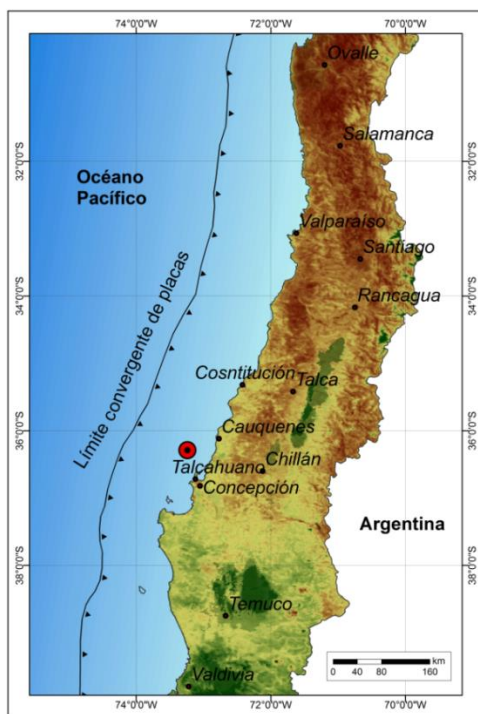


Figura 19. Presentación del entorno geográfico y localización de la zona de estudio y epicentro (punto rojo) para el sismo del 27 de febrero de 2010 en Chile.

Mapa Geológico de Chile

6.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales e insumos requeridos para el desarrollo de la investigación constituyen un archivo de datos térmicos superficiales satelitales y terrestres, datos satelitales de coberturas superficiales y mapas geológicos para el análisis y validación de los resultados obtenidos.

El conjunto de imágenes satelitales lo conforman la serie temporal presentada en la Tabla 1:

Tabla 1. Conjunto de imágenes satelitales

PRODUCTO	CONTENIDO	LOCALIZACIÓN	TEMPORALIDAD	FUENTE
MODIS MOD11A1	LST	Tiles: h11v12 y h12v12	01/02/2009-30/03/2009	LAADS/ NASA
MODIS MOD11A1	LST	Tiles: h11v12 y h12v12	01/02/2010-30/03/2010	LAADS/ NASA
MODIS MCD12Q1	Coberturas Superficiales	Tiles: h11v12 y h12v12	2009 y 2010	LAADS/ NASA

La adquisición de datos térmicos terrestres durante la época de ocurrencia del sismo para las regiones cercanas al epicentro es desarrollada por cortesía de la Dirección General de Aeronáutica Civil, Dirección Meteorología de Chile y la página web TuTiempo.net, permitiendo generar un archivo histórico de 10 años con registros de temperatura máxima diaria con $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ de precisión para 12 estaciones climatológicas (Anexo 1); (Cruz y Calderón, 2008) presenta el Mapa de Entornos Climáticos como base de una primera clasificación térmica. El contenido geológico y litológico es desarrollado a partir del Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000 generado por el Servicio Nacional de Geología y Minería, la Leyenda del Mapa Geológico de Chile y los mapas de Fallas Geológicas encontrados en los documentos publicados por (Vargas 2010; Piquer 2005; Arancibia *et al.*, 1999).

El procesamiento de datos satelitales se ejecuta utilizando las diferentes herramientas de análisis en los programas de desarrollo fotogramétrico y espacial ArcGIS 10.1 y ERDAS IMAGINE 9.2 bajo licencias de manejo adquiridas por la Universidad del Valle; para el análisis estadístico de datos térmicos y superficiales se tienen en cuenta las diferentes funciones matemáticas y gráficas del programa EXCEL.

6.3. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO SÍSMICO Y PRESENTACIÓN DE IMPACTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO: Sismo del 27 de Febrero de 2010 en Cauquenes, Maule, Chile.

El gran terremoto de magnitud 8.8 Mw que ocurrió el 27 de febrero a las 03:34 a.m. hora local (UTC-3) en la zona central de Chile (regiones de Maule y Biobío), se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca que subduce frente a la placa Suramericana en un área que se extiende aproximadamente desde la Península de Arauco por el sur hasta el norte de Pichilemu, cubriendo unos 450 km de longitud en dirección aproximada norte-sur por un ancho de 150 km. El hipocentro se ubicó en las coordenadas geográficas $36^{\circ}17'23''\text{S}$ y $73^{\circ}14'20''\text{W}$ (Figura 19), a una profundidad estimada de 35 km con una duración aproximada de 2 minutos con 45 segundos, en Santiago, y desplazamientos horizontales entre el contacto de las placas en el orden de 12-14m (Centro Nacional de Información de Sismos del Servicio Geológico de EEUU, NEIC; Barrientos 2010; Moreno *et al.*, 2010).

Las zonas más afectadas por el movimiento se localizan sobre las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago, O'Higgins, Maule, Biobío y La Araucanía, que acumulan más de 13 millones de habitantes, cerca del 80% de la población del país. En las regiones del Maule y el Biobío, el terremoto alcanzó una intensidad de IX en la escala de Mercalli, arrasando con gran parte de las ciudades como Constitución, Concepción, Cobquecura y el puerto de Talcahuano. En las regiones de La Araucanía, O'Higgins y Metropolitana, el sismo alcanzó una intensidad de VIII provocando una importante destrucción en Santiago y Rancagua, así como en las localidades rurales cercanas.

En consideración al origen y características del sismo, el mayor que rompe una brecha sísmica en zona de subducción (Moreno *et al.*, 2010), un fuerte tsunami impactó las costas chilenas como producto del movimiento, destruyendo varias localidades ya devastadas por el impacto telúrico; en el archipiélago de Juan Fernández, pese a no sentir el sismo, las marejadas arrasaron con su único poblado, San Juan Bautista y la alerta de tsunami generada para el océano Pacífico se extendió posteriormente a 53 países ubicados a lo largo de su cuenca, llegando a Perú, Ecuador, Colombia, Panamá, Costa

Rica, Nicaragua, la Antártida, Nueva Zelanda, la Polinesia Francesa y las costas de Hawái.

El sismo es considerado como el segundo más fuerte en la historia del país y uno de los cinco más fuertes registrados por la humanidad. Sólo es superado a nivel nacional por el cataclismo del terremoto de Valdivia de 1960, el de mayor intensidad registrado por el hombre mediante sismómetros. El sismo chileno fue 31 veces más fuerte y liberó cerca de 178 veces más energía que el devastador terremoto de Haití ocurrido el 12 de enero de 2010, y la energía liberada es comparable a 100.000 bombas atómicas como la liberada en Hiroshima en 1945 (Axel y Escobar, 2010).

6.4. CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS Y AMBIENTALES EN ZONA AFECTADA DURANTE SISMO EN CAUQUENES

Para cumplir y desarrollar el primer objetivo específico de este trabajo se procede a caracterizar la zona de referencia epicentral en sus variables físicas y ambientales o espaciales como: sísmica, geológica, de coberturas y térmica, identificando elementos que faciliten una descripción detallada en los diferentes ambientes propuestos. La tendencia térmica, las características litológicas regionales y las cubiertas presentes en la zona fueron clasificadas para facilitar el proceso de unificación y análisis del registro térmico como función de las demás variables.

6.4.1. Marco histórico y tendencia sísmica regional

En la Figura 20 se presenta el proceso geodinámico de la placa de Nazca, mostrando las diferentes velocidades de convergencia respecto a la placa Suramericana y exponiendo convergencias frente a Chile con una variación entre 6.5 a 7cm/año (Barrientos 2010). Estas velocidades han sido determinadas con precisión geodésica mediante observaciones GPS (Sistema de Posicionamiento Global) en las islas de Pascua, Juan Fernández y San Félix ubicadas sobre la placa de Nazca y sitios estables en Sudamérica, principalmente en localidades cerca de la costa Atlántica en Argentina y Brasil; y hacia el sur de la placa de Nazca en la Península de Taitao donde se encuentra el punto de convergencia triple entre las placas Antártica y de Nazca que penetran bajo la placa Sudamericana. Dicha convergencia es responsable de la ocurrencia de los grandes terremotos por subducción en Chile (Barrientos 2010).

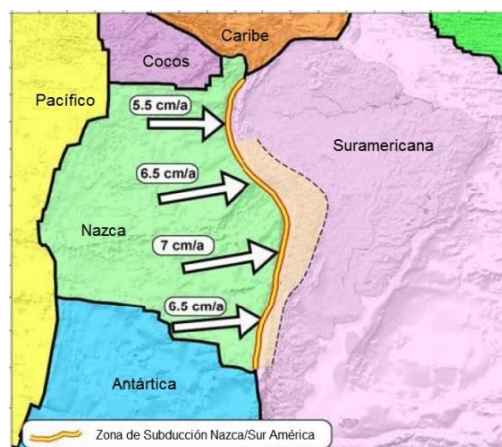


Figura 20. Dinámica de convergencia y subducción de placas en la región cordillerana andina de Chile y Sur América

Barrientos 2010

Según Moreno *et al.* (2010), las condiciones sísmicas locales en la región de Maule (Chile) indicaban que la distribución no homogénea por liberación de energía durante los últimos años evidenciaban una brecha sísmica en el sector de Constitución, presentando un alto potencial sobre la base histórica; la cual mitiga con el terremoto del 27 de febrero y se respalda por mediciones del avance espacio geodésico por bloqueo de placa que acumulaba tensiones importantes en las décadas anteriores al evento; de esta forma el último gran terremoto en la brecha Constitución ocurrió hace 175 años en 1835, con una magnitud estimada menor a 8.5 Mw; desde entonces, tres grandes terremotos ocurrieron al norte con magnitudes de 8.4 Mw en 1906, <8 Mw en 1928 y 7.8 Mw en 1985; y al sur de la brecha uno de magnitud 9.5 Mw en 1960 (Gran terremoto de Valdivia), presumiblemente después de haber lanzado sólo una pequeña fracción de las tensiones acumuladas desde 1835.

En esta zona el terremoto que provocó el mayor número de víctimas fue el del 24 de enero de 1939, en hora local 23:32, con magnitud 7.8 Mw, profundidad de 60 km y epicentro en Chillán región del Biobío (Chile), causando la pérdida de 30000 vidas humanas, aproximadamente 3500 edificios derrumbados en el choque inicial; después de las réplicas el 95% de la ciudad fue destruida; mientras que el terremoto de mayor magnitud y al mismo tiempo el más fuerte registrado en la historia con una magnitud de momento igual a 9.5 ocurrió el 22 de mayo 1960; en el ámbito local la mayor afectación sobre la ciudad de Valdivia, de ahí su nombre: “El Gran Terremoto de Valdivia”. Como consecuencia del choque inicial las olas del tsunami generado afectaron el sur de Chile, el archipiélago de Hawaii, Japón, las islas Filipinas y la costa oeste de los EE.UU. Los daños no se lograron estimar con precisión debido a la gran superficie afectada por el terremoto, sin embargo, diferentes fuentes mencionaron un total de víctimas de 2231, 3000 o 5700, y con respecto a la economía, pérdidas entre 400 y 800 millones de USD. En Valdivia, el 40% de las viviendas fueron destruidas.

Desde 1920 hasta la actualidad, en la región del Biobío han ocurrido 11 eventos sísmicos con magnitudes entre 7 a 8.0 Mw que han afectado los sectores de Quirihue, Lebu, Concepción, Angol, San Antonio e isla Mocha, con profundidades superficiales hasta los 70 km. Entre estos sismos, uno de los más importantes es el terremoto de Algarrobo el 3 de marzo de 1985 con una magnitud de 8.0 Mw, dejando 177 pérdidas fatales, 2575 heridos y casi un millón de damnificados. De igual manera en la región del Maule se registra una actividad sísmica importante que, desde el sismo de 1890 de magnitud 8.0 Mw hasta la fecha, ha afectado zonas estratégicas como las poblaciones de Talca, Curico, Linares, Constitución, Cauquenes (Cobquecura) con eventos de magnitudes entre 6-8.8 Mw y profundidades de hasta 118 km (Moreno *et al.*, 2010).

Respecto al movimiento sísmico del 27 de febrero el choque inicial duró aproximadamente 3 minutos, generando reajustes importantes durante el mes siguiente con 257 réplicas de consideración en un área grande a lo largo de la superficie de ruptura (hasta el 20 de marzo), de las cuales 18 tenían una magnitud de momento mayor que 6. En la Figura 21 se presenta la distribución espacial de dichas réplicas y un índice en función de la magnitud y cantidad de registros después del movimiento principal (Ene y Craifaleanu, 2010).

Es necesario destacar que la probabilidad de ocurrencia de un evento de las mismas características; es decir, la activación de la falla que genere un terremoto de magnitud 8.8 Mw en la misma región es muy baja. Para permitir desplazamientos del orden de 12-14m

en el futuro, será necesaria la acumulación de energía elástica durante decenas de años, ya que la tasa de convergencia es del orden de 6.7 cm/año (Barrientos 2010).

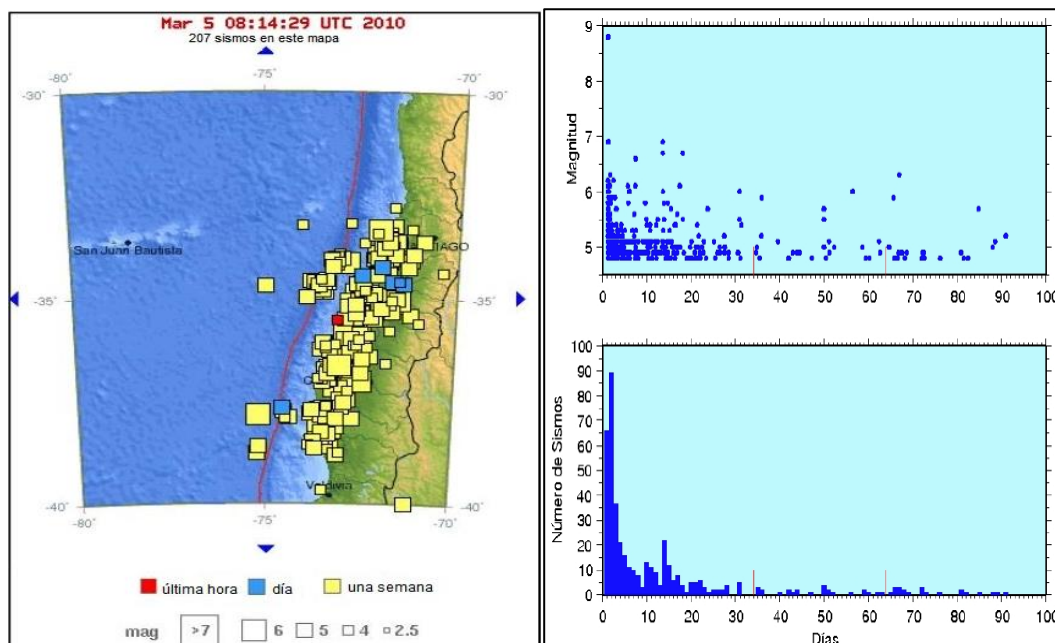


Figura 21. Izquierda: Distribución espacial de movimientos posteriores al evento principal. Derecha: Distribución temporal de las réplicas en función de su magnitud y el número de sismos por día registrados hasta tres meses después del evento principal.

Ene y Craifaleanu, 2010; Barrientos 2010

6.4.2. Unidades, estructuras litológicas y períodos geológicos regionales

La componente geológica en la zona de estudio comprende los sistemas de Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal para las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana de Santiago, O'Higgins, Maule, Biobío, Araucanía; regiones IV, V, VI, VII, VIII y IX respectivamente (Figura 22). Constituida principalmente por basamento cristalino; es decir, rocas ígneas y metamórficas de edad Paleozoica, la Cordillera de la Costa presenta intrusiones del Jurásico y Cretácico en su borde oriental y secuencias estratificadas del Mesozoico que forman un homoclinal con manteo al este. La Depresión Central corresponde a un rasgo principalmente erosivo o graben marcado por una escarpe de falla erodado relleno parcialmente por material sedimentario y volcanosedimentario de edad Pleistocena a Holocena (Rauld 2002). Los depósitos cenozoicos prepliocenos de Chile central (33-36°S) constituyen el grueso de la Cordillera Principal, destacando las formaciones Abanico y Farellones, se localizan espesores de 3000m de rocas volcánicas, en algunos sectores con intercalaciones piroclásticas, volcanoclásticas y subordinadamente sedimentarias, las cuales localmente se encuentran fuertemente plegadas. Además, incluye numerosas intrusiones subvolcánicas de la misma edad del volcanismo y presenta una paragénesis de minerales metamórficos de bajo grado bien desarrollada (Piquer *et al.*, 2010).



Figura 22. Sistemas morfoestructurales y regiones político-administrativas en zona de estudio; el punto rojo representa la ubicación del epicentro para el sismo del 27 de febrero de 2010.

Mapa Geológico de Chile

A continuación se describen los entornos geológicos encontrados en la zona de estudio en sentido Norte-Sur respecto a cada una de las regiones administrativas.

La región de Coquimbo pertenece a la zona intrusiva del arco magmático Cretácico donde predominan formaciones estratiformes volcano sedimentarias del Neocomiano y rocas graníticas como diorita, granodiorita, monzodiorita y tonalita, presentando dentro de la Formación Arqueros plutones graníticos de escala temporal Aptiense-Albiense. Los estratos consisten, mayormente, en flujos de lava andesíticos y brechas intercaladas con toba riolítica, calizas marinas fosilíferas y areniscas rojas de aproximadamente 900m de espesor. Las exposiciones intrusivas de diorita se constituyen bajo textura holocristalina equigranular y están compuestas principalmente de plagioclasa, biotita, hornblenda, cummingtonita, clinopiroxeno (augita) y ortopiróxeno con pequeñas cantidades de cuarzo, zircón, titanita, magnetita y apatita; el feldespato alcalino está prácticamente ausente en estas rocas, mientras que la plagioclasa es el mineral más abundante. Se reconocen diques aplíticos que dan lugar a zonas de skarn con alternación entre calizas y mármol cristalino con contenido de granate granular, flogopita irregular y diseminación de pequeñas cantidades de minerales de sulfuro, tales como pirrotita, calcopirita, la piritita, esfalerita y covelina secundaria (Sugaki *et al.*, 2000).

En la región de Valparaíso se exponen batolitos y complejos metamórficos del Paleozoico Superior constituyentes del basamento para la secuencia volcano sedimentaria del

intraarco y plutones del Mesozoico (Triásico Superior-Cretácico). Los depósitos marinos de plataforma somera del Mioceno-Plioceno y escasos remanentes de lavas basálticas representan los eventos geológicos más relevantes del Cenozoico, mientras que los depósitos piroclásticos producto de la actividad volcánica cuaternaria provenientes de la cordillera Andina cubren las zonas topográficamente deprimidas. En la zona litoral se encuentran como enclaves intrusivos del Complejo Metamórfico Valparaíso gneises tonalíticos y graníticos, anfibolitas, esquistos anfibólicos y lentes paragneísicos deformados en pliegues localmente afectados por foliación milonítica.

Los plutones Paleozoicos están constituidos por rocas foliadas, predominantemente tonalitas y granodioritas de anfíbola y biotita, con granitos de anfíbola-biotita y microclina, cuya cristalización se produjo en el Carbonífero Superior y su enfriamiento en el Pérmico (274-289 Ma.). Las rocas básicas contienen una mineralogía primaria dominada por hornblenda y plagioclasa cálcica, parcialmente metamorfizada donde predominan las tonalitas, granodioritas, granitos, monzodioritas cuarcíferas y dioritas con presiones de cristalización entre 5.4-2.8kb.

La tectónica de esta zona consiste en bloques de basamento limitados por fallas verticales a subverticales, siendo la traza principal la Falla Melipilla cubierta por depósitos cuaternarios del valle del río Maipo y que expone bloques de granitos paleozoicos incluidos en intrusivos jurásicos y cretácicos y parte de la secuencia estratificada con base metamorfizada, a partir del Cretácico Inferior (Yáñez *et al.*, 1998).

Continuando con la descripción y donde se localiza la región de mayor interés se precisan las descripciones geológicas para las regiones del Maule y Biobío. En la del Maule hacia el litoral se exponen rocas sedimentarias continentales del Triásico Tardío al Jurásico Temprano, con un espesor máximo de 2600 m (Curepto), y hacia el oriente rocas volcánicas del Jurásico Superior. Las rocas sedimentarias forman parte de un cinturón casi continuo de unos 60 km de largo, con discordancias, que recubre el basamento metamórfico paleozoico tardío, donde el desarrollo tectónico se generó durante el Triásico y está controlado por los movimientos continuos y diferenciales tras el levantamiento del basamento Paleozoico, acción que permitió la conformación de las cuencas sedimentarias Vichuquén-Tilicura al norte y Hualañé-Gualleco más al sureste, las cuales se caracterizan por presentar secuencias marinas de lutitas, areniscas y conglomerados, granitoides del Carbonífero. Se reconocen dioritas y granodioritas del Jurásico, flujos de lava andesíticos, brechas volcánicas e intercalaciones sedimentarias marinas menores de un espesor máximo de 3600m (Belmar y Morota, 2005).

El último sector a describir está conformado por el territorio de las regiones de Biobío y Araucanía donde predominan los ambientes del Triásico al Paleógeno. La región presenta rocas sedimentarias clásticas exclusivas del Triásico superior conformadas por depósitos de los ríos, lagos, playas y abanicos aluviales, lutitas negras, mudstone arcilloso de color gris oscuro e intrusiones graníticas del Paleozoico (Gallego *et al.*, 2005). Se encuentran areniscas, brechas, tobas e intercalaciones de calizas y lavas andesíticas-dacíticas de la Formación Cura-Mallín; así como batolitos (rocas plutónicas félsicas) cuya composición varía en granito de diorita (Mioceno) cubiertos discordantemente por piroclastos y lavas de composición predominantemente andesítica de grano muy fino, con frecuencia pedernal o vítreo, que presentan 100-200m de espesor; éstas lavas están expuestas al noroeste y noreste del subcomplejo Cerro Blanco y contienen olivino, plagioclasa y clinopiroxeno (Dixon *et al.*, 1999).

6.4.2.1. **Digitalización e identificación de unidades geológicas y rocas presentes en la zona de estudio**

Una vez identificadas las formaciones y descripciones geológicas presentes en las diferentes regiones que conforman la zona a caracterizar geológicamente se recurre a la carta o Mapa Geológico de Chile a escala base 1:1.000.000, generado por el Servicio Nacional de Geología y Minería en 2003, para extraer en formato vectorial cada uno de los polígonos o unidades geológicas y definir caracteres que permitan un análisis detallado en dicha zona.

Inicialmente se realiza el proceso de georeferenciación de la imagen con el contenido geológico (Figura 23), la cual se delimita entre las localidades de Valdivia hasta Ovalle, sentido Sur-Norte, y a lo ancho del territorio chileno; obteniendo un error en este proceso de 0.012 con una transformación polinómica de grado 3 para 270 puntos de control, mediante la herramienta Rectify del paquete Georeferencing de ArcGIS.

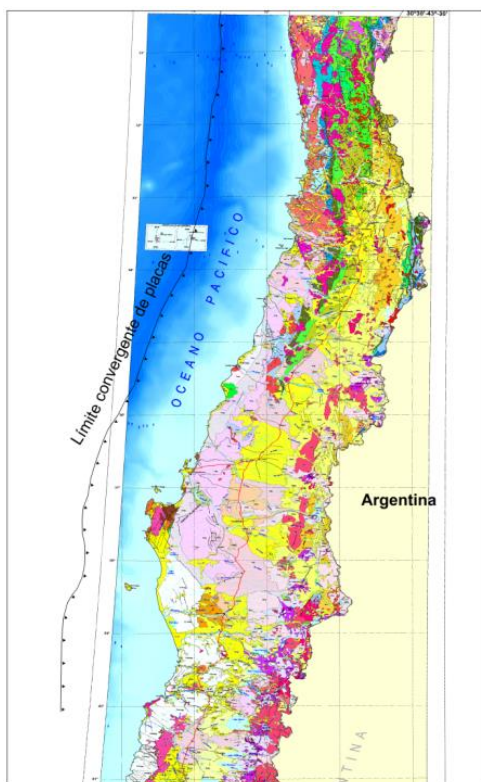


Figura 23. Mapa Geológico de Chile georeferenciado para proceso de digitalización de unidades geológicas, sección: hoja 2 de 3 (30°30'-43°30').

Mapa Geológico de Chile

Ya rectificada la imagen se procede a generar cada uno de los polígonos que contendrán la información geológica relevante o atributos vectoriales complementarios para el análisis espacial; estos atributos se definen dentro del marco o Leyenda del Mapa Geológico de Chile y se establecen como: unidad geológica, nombre de unidad, descripción de unidad, rocas específicas, tipo de roca, era y periodo de formación. De este proceso se obtienen 2452 polígonos que representan 84 unidades geológicas diferentes clasificadas en el tipo de roca consolidada como: Sedimentaria, Volcano sedimentaria, Volcánica, Intrusiva o Metamórfica; y presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Información geológica descriptiva para cada capa vectorial en la zona de estudio.

Período Geológico	Unidad Geológica	Tipo de Roca
Devónico	DC4, DC1	Metamórfica, Sedimentaria
Carbonífero	Pz4a, Pz4b, CPg, CP1	Metamórfica, Intrusiva, Sedimentaria
Pérmico	PzTr4, PzTr4(a), PzTr4(b), PTr3, P1m	Metamórfica , Volcánicas, Sedimentaria
Triásico	Tr1m, Tr2c, Tr1c, TrJg, TrJ3	Sedimentaria, Volcano sedimentaria, Intrusiva, Volcánica
Jurásico	Jig, Ji1m, Jsg, J3i, Js1m, Js2c, Js1c, J2m, JK3, JT4b, JK1m	Sedimentaria, Volcano sedimentarias, Volcánicas, Intrusiva, Metamórfica
Cretácico	Kig, Ki2m, Ki1m, Kibg, Ki2c, Kiag, Kia3, Kia2, Kia1c, Ksh, Ks3i, Ksg, Ks3a, Ks2c, Ks1m, KTg, KT2	Intrusiva , Volcano sedimentarias, Sedimentaria, Volcánicas
Paleógeno	PE1, PEg, E1m, Eg, E1c, Og, OM3b, OM1m, OM2c	Sedimentaria, Intrusiva, Volcánicas Volcano sedimentarias
Neógeno	M3i, Mimg, M1m, Mg, M1c, Mh, Msg, Ms3i, MP1c, MP1m, MP3, MP2, PPI3, PPI1c, PPI1r	Volcánica, Intrusiva, Sedimentaria, Volcano sedimentarias
Cuaternario	PI3t, PI1m, PI3, Qe, Q1g4, Q1g3, Q1g2, Q1g1, Q1g, Qa, Q3av, Qm, Qf, Q1, Q3i	Volcánica, Sedimentaria

Ahora, dada la necesidad de unificar la componente geológica y para contextualizar la importancia de los ambientes geológicos y el tipo de formación litológica dentro de esta investigación, se generan dos clasificaciones para la capa vectorial de acuerdo a los atributos temporal y litológico que permiten generalizar en la zona de estudio la influencia que dichas variables establecen al cambio térmico esperado; ya que en estos, según (Raissouni y Sobrino, 2000; Freund 2002; Mörner y Etiope, 2002; Saraf *et al.*, 2009), se concentran las condiciones geoquímicas y físicas que dan lugar a la variación térmica en presencia de gases y factores de flujo térmico superficial. De esta forma se obtiene en formato raster la componente temporal clasificada como: Devónico, Carbonífero, Pérmico, Triásico, Jurásico, Cretácico, Paleógeno, Neógeno, Cuaternario, y la componente litológica clasificada como: Sedimentaria, Volcano sedimentaria, Volcánica, Intrusiva, Metamórfica (Figura 24). Estas componentes son remuestreadas a 500m de resolución espacial con base en la resolución espacial del producto MCD12Q1, ya que la resolución espacial de éste producto es la resolución mínima entre las diferentes variables que conforman el conjunto de imágenes de análisis; el proceso de remuestreo se realiza con el objetivo de permitir la comparación y aplicación de operaciones matemáticas entre variables durante la intersección o cruce de capas y así facilitar el análisis por dinámica térmica respecto a las teorías propuestas.

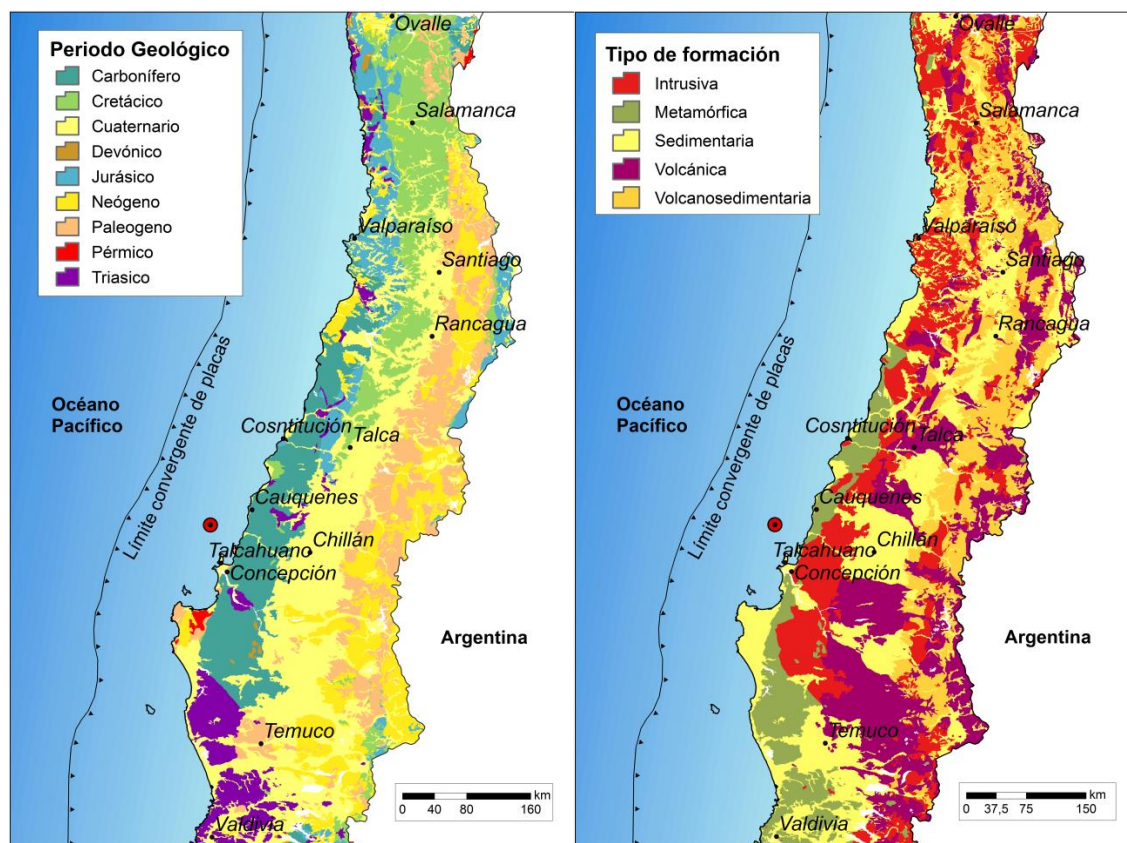


Figura 24. Izquierda: Período de formación geológica de unidades litológicas en zona de estudio. Derecha: Tipo de formación litológica presente en zona de estudio.

Mapa Geológico de Chile

6.4.2.2. Digitalización e identificación de fallas geológicas representativas en zona de estudio

Las fallas geológicas son otro de los elementos geológicos de mayor importancia dentro de este estudio ya que, como se menciona en las referencias, son las rutas rápidas de escape y por donde se genera la mayor circulación o interacción Litósfera-atmósfera respecto al proceso de desgasificación cortical. Por esta razón se presentan las fallas más representativas e importantes dentro del ámbito sísmico en la región de estudio. Este elemento fue generado como factor vectorial georeferenciado bajo las mismas condiciones y especificaciones espaciales que caracterizaron la componente geológica. Para conformar el conjunto total de fallas geológicas fue necesario utilizar diferentes fuentes o imágenes de referencia (Vargas 2010; Piquer 2005; Arancibia *et al.*, 1999), que permitieran generar un mosaico y digitalizar cada una de éstas y asignar detalles característicos como: Tipo, Longitud, Buzamiento. Dicho conjunto de fallas geológicas se presenta en la Figura 25 y está representado por las fallas más destacadas de la región, las cuales se describen en los siguientes párrafos.

Falla San Ramón: falla inversa localizada al pie de la precordillera cuya actividad levanta y monta el bloque de la corteza sobre el valle de Santiago, éste proceso ha sido en gran medida el responsable de la construcción del frente de montaña que involucra el abrupto desnivel vertical que se manifiesta entre el valle central, situado a una altura promedio de unos 500 msnm y el cerro San Ramón; con una longitud cercana a los 30 km cruza las

comunas de Vitacura, Condes, La Reina, Peñalolén y Puente Alto. Los últimos hallazgos evidencian que la falla permanece activa y que su más reciente evento fue hace algunos miles de años, por lo cual se estima que ha acumulado suficiente energía para producir un terremoto con magnitud de momento entre 6,9 y 7,4, con una profundidad de unos 10 km (Vargas 2010).

Falla Melipilla: falla subvertical con 50 km de longitud, se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios del valle del río Maipo y tiene un rumbo este-oeste entre la Depresión Central y Melipilla, hacia el oeste se bifurca en dos ramas de rumbo noroeste, una finalizando a la latitud del estero Cartagena y otra en las cercanías de El Quisco. Este sistema permitió la intrusión de plutones en el bloque norte, por esto al sur del río Maipo aflora la secuencia estratificada mesozoica dispuesta en contacto deposicional sobre granito del Paleozoico (Yáñez *et al.*, 1998).

Falla El Fierro: falla inversa, la más oriental en la Cordillera Principal, que tuvo antiguamente movimiento normal y conforma un sistema de fallas menores paralelas hacia el oeste coincidentes con la orientación de las masas intrusivas aflorantes. El arco magmático tiene la misma orientación e incluso los volcanes Planchón y Peteroa están ubicadas encima de la traza de la falla principal, por lo que se infiere que existe un control estructural del magmatismo en esta región (Piquer 2005).

Falla de Pichilemu: pasa, por algunas decenas de kilómetros, en las cercanías de Pichilemu. Desde el 27 de febrero en 2010 ha tenido mucha actividad, especialmente el 11 de marzo cuando se registró un movimiento de 6.9 Mw a menos de 10 km de profundidad. "Corresponde a una falla de larga vida (millones de años) cuya actividad no había sido detectada con anterioridad".

Falla Lliquiñe-Ofqui: su génesis ha sido relacionada directamente a la convergencia oblicua entre las placas de Nazca y Sudamericana (Cembrano *et al.*, 2000) y se extiende a lo largo de la cordillera de los Andes por unos 1.200 kilómetros en sentido norte-sur, ha estado activa al menos durante los últimos 6 millones de años, produciendo sismos de hasta 6.2 Mw a menos de 8 km de profundidad, como ocurrió en el fiordo de Aysén en 2007. La sismicidad cortical de 2007 documenta una estrecha vinculación y retroalimentación entre ruptura tectónica y transporte de magma. La geometría global de la falla consiste en segmentos rectos de orientación nor-noreste de centenares de kilómetros de largo unidos por lineamientos geomorfológicos en dirección noreste, ésta zona de falla corta rocas del Batolito Norpatagónico del Jurásico Superior, Cretácico y Mioceno, rocas metamórficas del Complejo Acrecionario Paleozoico y unidades volcano sedimentarias cenozoicas (Arancibia *et al.*, 1999).

Falla de Lanalhue: falla geológica que corre de noroeste a sur este en la cordillera de Nahuelbuta pasando por el lago Lanalhue, luego continúa por la Región de la Araucanía, atravesando los cerros Ñielol-Humpil y ConunHuenú y llegando a los volcanes Villarrica, Quetrupillán y Lanín. Forma parte de la Placa de Chiloé. Además esta falla poco conocida atraviesa grandes urbes como Temuco y Villarrica. Pone en contacto las Series Metamórficas Occidental con la Oriental del Basamento Metamórfico de la Cordillera de Nahuelbuta. En la actualidad es evidente una actividad sísmica anómala en el Bloque de Arauco, la cual es manifestada por una concentración de eventos sísmicos de intraplaca que permiten definir esta falla (Moreno 2004).



Figura 25. Principales sistemas de fallas geológicas identificadas alrededor de la zona de estudio

Vargas 2010; Yáñez et al., 1998; Piquer 2005; Arancibia et al., 1999; Moreno 2004

6.4.3. Descripción y categorización de Coberturas Superficiales

La variabilidad superficial referente al uso del suelo y a la respuesta por identificación de cubiertas superficiales se ve desarrollada bajo los protocolos que presenta el producto MCD12Q1, cuyo conjunto característico se describe en la interfaz web de procesos terrestre LP DAAC de la NASA. Recuérdese que según lo planteado se espera que el tipo de cubierta genere una influencia directa sobre el comportamiento térmico de la superficie terrestre, por esta razón se recurre a este producto ya que presenta una clasificación detallada sobre estructuras vegetales (tamaño, densidad y forma) que contribuyen a la condicionalidad en la respuesta térmica del suelo.

El producto MODIS LandCover MCD12Q1 proporciona datos de caracterización bajo cinco sistemas de clasificación de la cubierta terrestre a nivel mundial y proporciona una evaluación de tipo de cobertura terrestre, así como la información para su control de calidad. Los cinco esquemas o tipos de clasificación se derivan del método supervisado mediante sentencia de decisión y describen las propiedades de cobertura del suelo y se derivan de las observaciones registradas desde Terra y Aqua-MODIS durante un año. El esquema de cobertura de la tierra identifica 17 clases de cubiertas del suelo definidas por el Programa Internacional sobre la Geósfera y la Biósfera (IGBP, por sus siglas en Inglés), que incluye once clases naturales de vegetación, tres clases de tierras desarrolladas y tres clases de tierra sin vegetación (Friedl et al., 2010). A continuación se presenta cada una de las clasificaciones establecidas en el producto MCD12Q1 categorizada por tipo y su respectivo esquema:

- Cobertura del Suelo Tipo 1: esquema global para clasificación de la vegetación (IGBP)
- Cobertura del Suelo Tipo 2: esquema de la Universidad de Maryland (UMD)
- Cobertura del Suelo Tipo 3: esquema LAI / fPAR derivados de MODIS
- Cobertura del Suelo Tipo 4: esquema de Producción Primaria Neta derivados de MODIS (NPP)
- Cobertura del Suelo Tipo 5: esquema de Planta Tipo Funcional (PFT)

Reconocidas las clasificaciones contenidas en cada tipo de cobertura y en función de las características físicas como tamaño, densidad y forma se selecciona la banda 3 del producto MCD12Q1, (Cobertura del Suelo Tipo 3 (LAI / fPAR)), como la representación que más se ajusta a dichas condiciones físicas y cuya descripción de clasificación se especifica en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción de Tipo de Cobertura Terrestre (Esquema 3).

Clase	Cobertura (LAI/fPAR)	Descripción
0	Agua	Sustancia en estado líquido.
1	Hierbas/Cultivo de cereales	Planta que no presenta órganos decididamente leñosos.
2	Arbustos	Planta leñosa que se ramifica desde su base.
3	Cultivo de hoja ancha	Cultivo de hoja ancha.
4	Sabana	Ecosistema caracterizado por un estrato arbóreo-arbustivo en el que el dosel arbóreo tiene una escasa cobertura, ya sea por árboles pequeños o por haber poca densidad de ellos.
5	Bosque Latifoliado siempre verde	Comunidad de árboles y arbustos propios de los climas cálidos y húmedos, templados y fríos; se caracterizan por la presencia de especies del tipo Angiospermas.
6	Bosque Caducifoliodehoja Ancha	Ecosistema en el que sus elementos pierden parte de su follaje durante una época del año, forman un estrato arbóreo de 20-30m.
7	Bosque Aciculado siempre verde	Bosque natural cubierto por árboles de hojas en forma de aguja.
8	Bosque Caducifolio-aciculado	Bosques naturales con > 30% cubierto por el dosel arbóreo, en el que el dosel es predominantemente (más del 75%) de hoja aciculada y caduca.
9	Sin vegetación	Sin vegetación.
10	Urbano	Urbano.

Para la caracterización de cubiertas superficiales se adquieren las imágenes MCD12Q1 con Tiles h11v12 y h12v12 de los años 2009 y 2010 con el fin de conocer el tipo de coberturas presentes y establecer la variación y cambio de éstas en la región de análisis. Inicialmente se extrae en cada imagen la banda 3 que contiene la información de coberturas del suelo (LAI/fPAR), se realiza una reclasificación de los valores enteros de pixel a 11 clases y por último se hace una reproyección del sistema de referencia Sinusoidal al Geodésico Mundial (WGS84) y se recorta la zona de interés para obtener los

productos de coberturas presentados en la Figura 26. La máscara de extracción se define por la zona acotada inicialmente en el proceso de caracterización geológica.

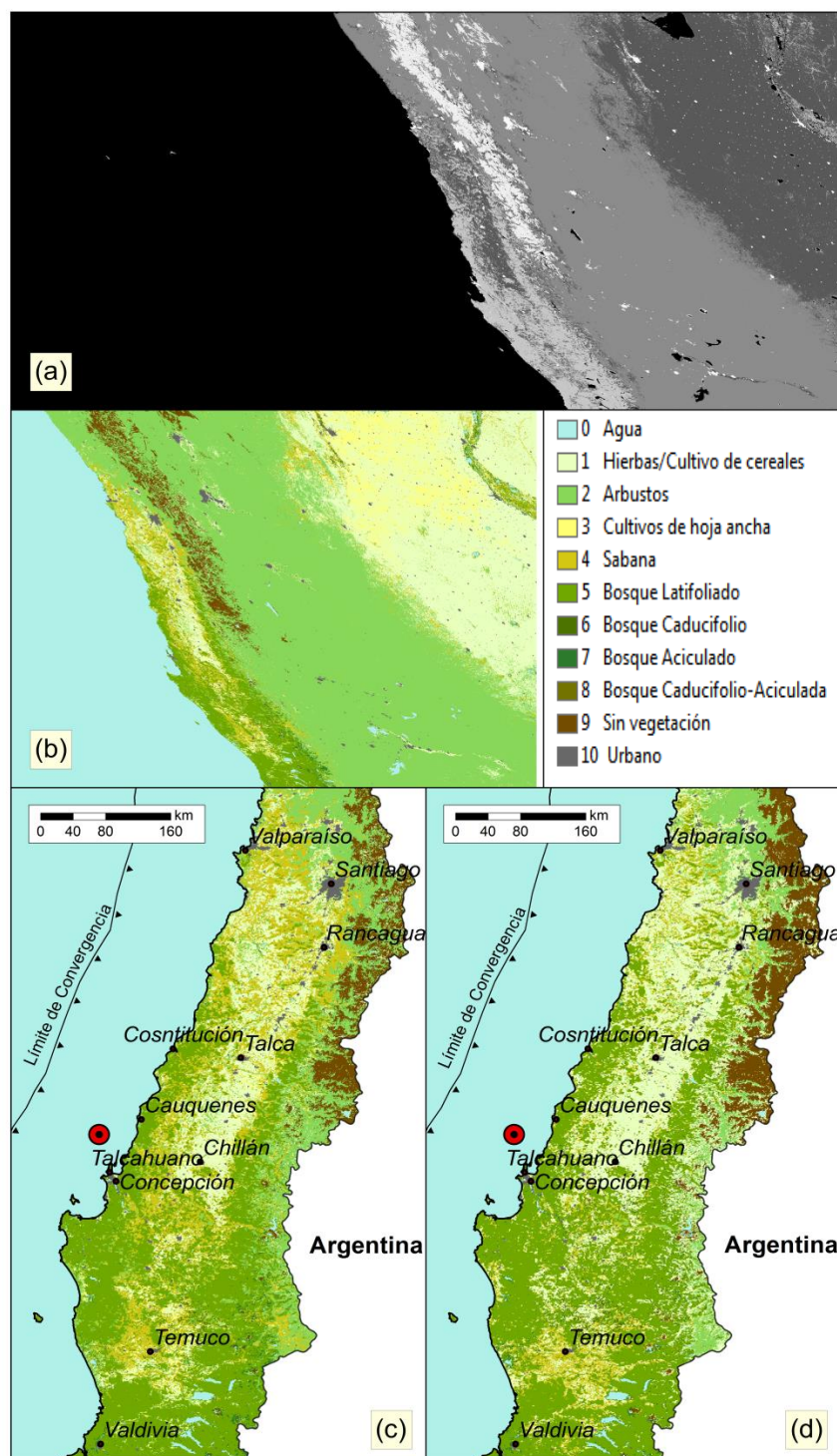


Figura 26. (a) Unión de Tiles h11v12 y h12v12 correspondientes a banda LAI/fPAR. (b) Reclasificación de los valores enteros de pixel a las 11 clases de cubiertas. Coberturas superficiales 2009 (c) y 2010 (d) para región de interés, reproyectadas a Sistema WGS84. LAADS/ NASA 2009 y 2010

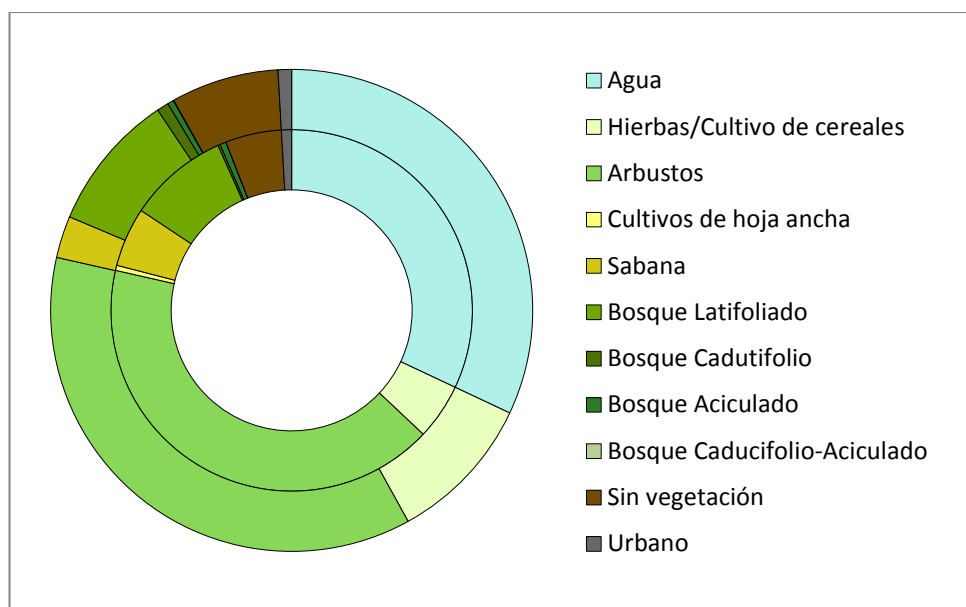
Ya clasificadas las imágenes de coberturas superficiales se procede a consultar el histograma de frecuencias para cada una y a relacionar la variabilidad de coberturas en las escenas, de lo cual se genera la Tabla 4 que contiene las frecuencias por clase o cobertura y el área que cada una ocupa en los años de interés.

Tabla 4. Frecuencia y área de las diferentes coberturas superficiales en zona de análisis.

Cobertura	Frecuencia		Área superficial específica ($\pm 0.25 \text{ km}^2$)	
	Año 2009	Año 2010	Año 2009	Año 2010
Agua	507619	507606	126904.75	126901.5
Hierbas/Cultivo de cereales	79747	158250	19936.75	39562.5
Arbustos	658899	579961	164724.75	144990.25
Cultivos de hoja ancha	7305	0	1826.25	0
Sabana	84095	44625	21023.75	11156.25
Bosque Latifoliado	142723	147179	35680.75	36794.75
Bosque Cadutifolio	3158	12589	789.5	3147.25
Bosque Aciculado	8813	6482	2203.25	1620.5
Bosque Caducifolio-Aciculado	39	497	9.75	124.25
Sin vegetación	79550	114760	19887.5	28690
Urbano	14408	14407	3602	3601.75
Área total de escena			396589	396589

Con base en los datos de la Tabla 4 se grafican las áreas de cada cobertura para los años 2009 y 2010 mediante la representación de gráficos de anillos, donde se muestra la dinámica superficial de cada una (Figura 27). El anillo interno corresponde a las áreas de coberturas en 2009 y el anillo externo a las áreas de cobertura en 2010, también se calcula el porcentaje de variabilidad por área en coberturas respecto al año 2009 teniendo en cuenta el área total de la escena, donde se especifica la pérdida con signo negativo y la ganancia de área para cada cobertura como se presenta en la Tabla 5.

El cálculo del porcentaje de variabilidad por presencia de coberturas presentado en la Tabla 5, se realiza con el propósito de determinar cambios significativos de cubrimiento espacial de las clases vegetales más representativas en la zona de estudio, ya que el objetivo de establecer la influencia de éstas clases en la variabilidad y dinámica espacial en LST debe satisfacer una presencia continua tanto temporal como superficialmente de las mismas en dicha zona.



Elaboración propia

Tabla 5. Variabilidad superficial de coberturas respecto a datos de 2009

Cobertura	% Área Relativa		% Variabilidad Respecto 2009
	Año 2009	Año 2010	
Agua	31.999	31.998	-0.003
Hierbas/Cultivo de cereales	5.027	9.976	49.607
Arbustos	41.535	36.559	-11.980
Cultivos de hoja ancha	0.460	0.000	-100.000
Sabana	5.301	2.813	-46.935
Bosque Latifoliado	8.997	9.278	3.028
Bosque Cadutifolio	0.199	0.794	74.915
Bosque Aciculado	0.556	0.409	-26.450
Bosque Caducifolio-Aciculado	0.002	0.031	92.153
Sin vegetación	5.015	7.234	30.681
Urbano	0.908	0.908	0.007

Estos datos permitieron especificar que las clases o coberturas más estables son Agua, Urbano y Bosque Latifoliado, que las coberturas con mayor aumento son Bosque Cadutifolio, Bosque Caducifolio-Aciculada, Hierbas/Cultivo de cereales y Sin vegetación, siendo estas últimas las de mayor proporcionalidad con aumentos de 19625.75 y 8802.5 ± 0.25 km² respectivamente, las coberturas con mayor pérdida son Sabana y Bosque Aciculado con una variabilidad del 47 y 26% respectivamente; y que la cobertura de Cultivos de hoja ancha presentó una pérdida del 100% representada en un área de 1826.25 ± 0.25 km² cedida principalmente a la cobertura de Hierbas/Cultivo de cereales.

6.4.4. Tendencia, categorización y comportamiento térmico regional

Para describir los entornos climáticos presentes en la región de estudio se toma información generada por Cruz y Calderón (2008) representada en la Figura 28(a), donde se especifican aspectos claves en la definición térmica de las clases climáticas de la región durante la temporada de verano (diciembre a marzo); la cual a su vez se ve condicionada por la topografía local. La numeración en ésta figura corresponde a las descripciones para cada entorno climático.

1. Estepa con nubosidad abundante: Este clima se presenta bordeando la costa pacífica y es característico por presentar abundante nubosidad baja y frecuentes nieblas y lloviznas que tienden a disiparse al mediodía; éstas condiciones se extienden por los valles transversales alcanzando algunas decenas de kilómetros hacia el interior. La cercanía del mar produce amplitudes térmicas bajas (diferencia entre las máximas y las mínimas medias) de 8°C, presentando promedios máximos en verano de 21.6°C.
2. Estepa con gran sequedad atmosférica: Se presenta hacia el interior de la región de Coquimbo extendiéndose por toda la zona transversal hasta la frontera con Argentina, allí las precipitaciones eliminan los rasgos desérticos y su principal característica son los cielos predominantemente despejados, la baja humedad relativa y las altas temperaturas durante el día debido a que ocupa una zona dentro de la franja de inversión térmica. Tiene una amplitud térmica diaria del orden de 18 a 20°C y presenta en verano un promedio máximo de 30.6°C con una mínima media que desciende a 12.6°C.
3. Templado cálido con estación seca prolongada de 8 a 7 meses: Presenta una estación seca durante los meses de verano con una amplitud térmica anual alta, casi 13 grados de diferencia entre el mes más cálido (enero) y el más frío (julio). La temperatura máxima promedio en verano alcanza un valor de 29.7°C y la mínima llega a 13.0°C.
4. Templado cálido con estación seca prolongada de 8 a 7 meses y gran nubosidad: Las características son similares a las registradas en el clima templado cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada de 7 a 8 meses, con la diferencia que la nubosidad es mucho menos persistente y las temperaturas definen mayores amplitudes térmicas anuales. La temperatura máxima promedio en verano alcanza un valor de 29.5°C y la mínima promedio llega a 10.5°C.
5. Templado cálido con estación seca de 5 a 4 meses: Es el clima que se observa en la zona que comprende la Precordillera entre las regiones Metropolitana de Santiago, O'Higgins, del Maule y la parte norte de la región del Biobío. El ascenso del relieve provoca grandes variaciones en el clima, dando paso a condiciones de mayor humedad y frío en las zonas andinas (Matus y Novoa, 2006), con temperaturas homogéneas durante todo el año y precipitaciones que se concentran durante los meses invernales (Castillo y Moreno, 2000), acortándose así la duración de la estación seca a sólo 4 o 5 meses con precipitación inferior a 40 milímetros durante la época. La temperatura máxima promedio en verano alcanza un valor de 22.8°C y la mínima es de 10.5°C.

6. Templado Cálido de estación seca corta menor a 4 meses: Se localiza sobre la franja en el sector costero desde el Golfo de Arauco hasta la latitud -38° . Esta zona comprende una sección de la Cordillera de Nahuelbuta, cercana al litoral, y ejerce un importante efecto diferenciador de las características térmicas, pluviométricas y de viento en ambos lados de ella. La temperatura máxima en verano alcanza un valor de 22.8°C y la mínima promedio llega a 10.5°C .
7. Templado lluvioso con influencia mediterránea: Este clima cubre la zona comprendida entre la latitud -38° en la región de Araucanía hasta la latitud de Castro, en Chiloé, sobre toda la extensión transversal del territorio. Presenta una distribución continua de precipitaciones durante todo el año, alcanzando valores climatológicos anuales de hasta 2000 milímetros; aunque no es posible distinguir una estación seca. La temperatura máxima promedio en verano alcanza un valor de 23.8°C y la mínima desciende a 9.0°C .

Esta clasificación climática permite definir dos escenarios térmicos diferentes en la región de estudio y así dos clases de tendencia térmica máxima, una más cálida que se introduce en la región central desde el norte con temperaturas que oscilan alrededor de los 30.7°C y otra menos cálida al norte y centro-sur con temperaturas máximas entre 21.6 a 23.8°C como se indica en la Figura 28(b).

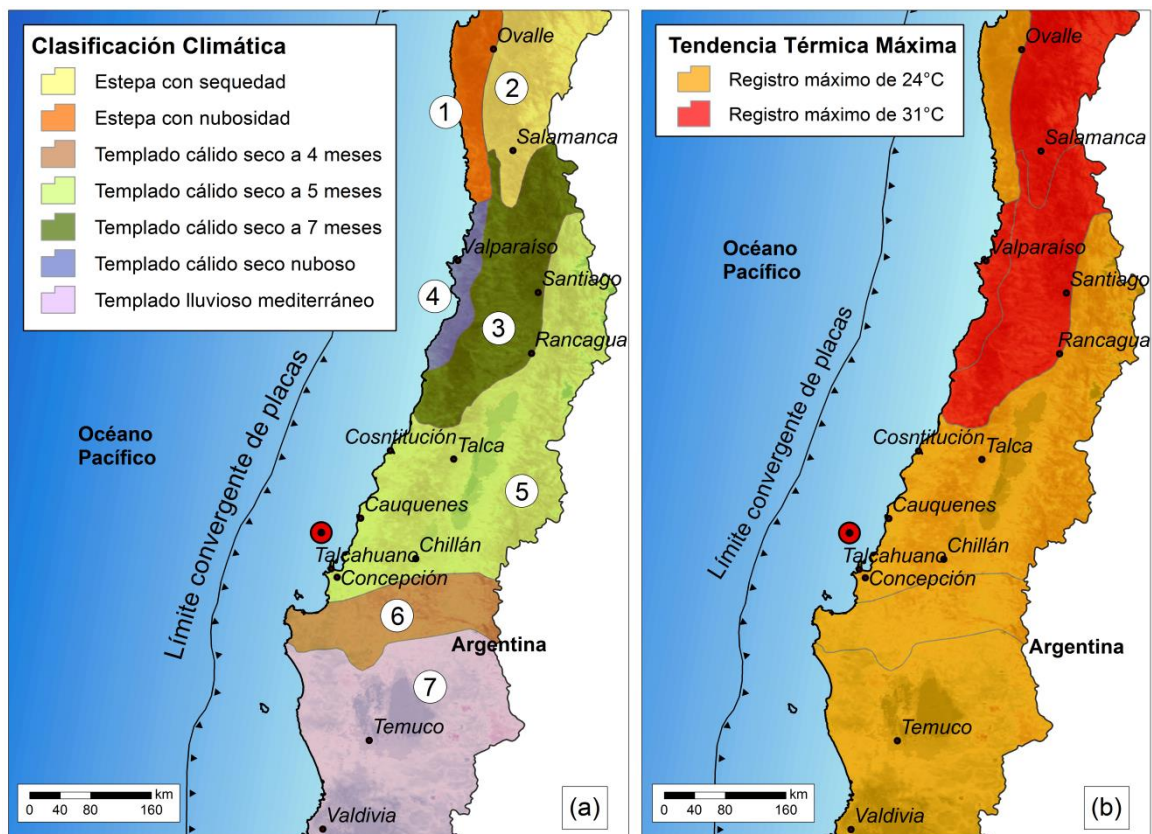


Figura 28. (a) Clasificación por descripción de entornos climáticos. (b) Clasificación por tendencia térmica de entornos climáticos, la región naranja representa los entornos con temperaturas máximas de 24°C y la región en rojo los entornos con temperaturas entre 24 - 31°C , siendo 31°C el valor máximo.

Cruz y Calderón, 2008

6.4.4.1. *Recolección de datos térmicos en estaciones climatológicas y delimitación temporal de análisis superficial*

La obtención de datos de temperatura del aire registrados dentro de la zona de estudio se realiza desde la página web oficial de la Dirección General de Aeronáutica Civil, Dirección Meteorología de Chile y la página *TuTiempo.net* que cuenta con una base de datos climatológicos que se apoya de información gubernamental y privada a nivel mundial. Estas fuentes permitieron identificar y ubicar geográficamente 12 estaciones climatológicas que contienen datos de temperatura media y máxima diaria para la región de interés relacionadas en la Tabla 6 y presentadas en la Figura 29; además, generar una base temporal desde el año 2000 hasta el 2011 para el intervalo comprendido entre el 1° de febrero hasta el 30 de marzo (días julianos 32 al 90) presentada en el Anexo 1. Dicha base temporal contiene la amplitud mínima necesaria para establecer la tendencia térmica máxima de la región y delimitar el rango anómalo que contiene la fecha de interés, es decir, el 27 de febrero o juliano 58.

Tabla 6. Datos geográficos de Estaciones Climatológicas

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Chillán	-36.58	-72.03	124
Concepción	-36.76	-73.06	12
Curicó	-34.96	-71.21	228
La Serena	-29.91	-71.2	142
Los Ángeles	-37.46	-72.35	139
Pudahuel	-33.38	-70.78	475
Quinta Normal	-33.43	-70.68	520
Rodelillo	-33.04	-71.53	330
Santo Domingo	-33.65	-71.61	75
Temuco	-38.76	-72.63	114
Tobalaba	-33.45	-70.56	654
Valdivia	-39.63	-73.06	19

Los datos registrados en cada estación permiten detallar las tendencias térmicas que presenta la clasificación climática en la Figura 28(a) mediante la elaboración de gráficos o curvas de variación térmica (TVC, pos sus siglas en inglés), definir el rango temporal para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales y constituir la base de comprobación directa en el proceso de validación para la dinámica anómala LST en la región de estudio.

De esta forma, con base en el registro climático en las estaciones terrestres, se establece una amplitud temporal de estudio equivalente a 20 días que inicia el 14 de febrero y finaliza el 5 de marzo (días julianos 45 al 64) ya que durante este período se incluye la máxima diferenciación térmica por cambio en ascenso y descenso de temperatura en la región. Para establecer dicho rango se tomaron los promedios seriales anuales; es decir, el promedio entre los meses de febrero y marzo por año, y luego el promedio histórico o anual para cada estación de la base temporal, lo que permitió identificar que el inicio de mayor variabilidad térmica durante la época del sismo estaba alrededor de los días 14 y 16 de febrero (julianos 45 y 47) y finalizaba entre el 4 y 6 de marzo (julianos 63 y 66). Esto evidenció un máximo de temperatura en el aire entre 29-32°C el 24 de febrero (juliano 55)

y al día siguiente una disminución entre 7-14°C para las estaciones de Chillán, Los Ángeles, Curicó, Temuco y Pudahuel, las demás estaciones presentaron una secuencia ascendente con cambios menores a 4°C (Figura 29), mostrando que las clases de temperatura máxima obtenidas para la Figura 28(b) satisfacen la condicionalidad climática de la región. Este proceso permite minimizar el tamaño del conjunto de imágenes satelitales a analizar en la búsqueda de cambios térmicos espaciales importantes en la región.



Figura 29. Estaciones climatológicas con mayor incremento térmico durante la semana del 27 de febrero de 2010

Dirección Meteorología de Chile

6.5. OBTENCIÓN DE COMPORTAMIENTO LST MEDIANTE EL USO DEL PRODUCTO MOD11A1 Y DEFINICIÓN DE CLASES TÉRMICAS DE TENDENCIA ANÓMALA

Dadas las condiciones de temporalidad y espacialidad que presenta el fenómeno térmico, la definición del tipo de sensor a utilizar se basa en la necesidad de cubrir una secuencia diaria que permita enfocar el periodo con el mayor aumento térmico durante la ocurrencia del sismo en Cauquenes. Como es conocido, la temperatura ambiental varía principalmente en su componente altitudinal mientras que las componentes de latitud, longitud y temporal son más estables y presentan, en una región determinada, la misma tendencia térmica en grandes extensiones con variaciones mínimas locales en periodos específicos. Por estas razones se selecciona el producto MOD11A1 del sensor MODIS en la plataforma TERRA, ya que con sus diferentes especificaciones de resoluciones temporal: diaria, radiométrica: 16 bits y espacial: 1 km, permite una representación ideal al proceso de obtención espacial en la tendencia térmica superficial en la zona de estudio. El

producto MOD11A1 brinda estimaciones de LST en grados Kelvin con $\pm 0.5^{\circ}\text{K}$ de precisión y es generado como promedio o máximo de la tendencia térmica capturada en el producto MOD11_L2 cuya temporalidad es de 5 minutos.

Para conocer el valor de temperatura en cada pixel en la escena de estudio, inicialmente se realiza el mismo proceso de extracción, unión y transformación de sistema de referencia en banda utilizado en el producto MCD12Q1; en este caso se extrae la capa o banda 1 del producto MOD11A1 de los Tiles h11v12 y h12v12 en los años 2009 y 2010, y se aplica el factor de cambio de datos IFOV para obtener LST en grados Celsius mediante el algoritmo descrito en la ecuación 9, el cual fue modelado en el software ERDAS.

El proceso de obtención de valores LST_c se realiza para la propuesta de amplitud temporal de 20 días que hace referencia al intervalo entre el 14 de febrero al 5 de marzo para los años 2009 y 2010, definido con base en las tendencias de variabilidad registradas en las estaciones terrestres (Figuras 30 y 31 en Capítulo de Resultados). Este proceso evidencia que la mayor percepción en cambio térmico superficial se ubica entre el 19 de febrero y el 2 de marzo en 2010 (día juliano 50 al 61), permitiendo establecer un nuevo conjunto temporal con 6 imágenes térmicas donde se definen 6 clases con intervalos de 10 y 5°C de acuerdo a los dos escenarios climáticos obtenidos en la clasificación de entornos de la Figura 28(b), estos intervalos se especifican con base en el registro histórico de las estaciones climatológicas donde las tendencias climáticas marcan un ambiente más cálido al centro con promedios anuales mensuales de hasta 29.26°C y otro al sur, sin incluir el borde costero, con temperaturas máximas promedio de 24.36°C .

Dado que el objetivo de esta clasificación es identificar donde y cuando se registraron cambios térmicos con valores superiores a la condición térmica normal, las clases generadas especifican que el rango de $31\text{-}45^{\circ}\text{C}$ representa una anomalía en la zona centro-norte mientras que los valores térmicos entre los rangos $26\text{-}30^{\circ}\text{C}$ y $31\text{-}45^{\circ}\text{C}$ identifican anomalías para el resto de la escena. Esto permite obtener el conjunto definitivo de imágenes LST que representan y contienen la tendencia anómala objeto de análisis respecto a las demás variables espaciales (geología, coberturas superficiales) durante la época del sismo en Cauquenes.

6.6. CRUCE DE VARIABLES ESPACIALES FRENTE A LA VARIACIÓN TÉRMICA

Una vez obtenido el conjunto de imágenes para las variables espaciales involucradas en el proceso de análisis que explica el comportamiento del fenómeno térmico, se realiza una reclasificación en los valores del histograma para las imágenes referentes a coberturas superficiales, periodo geológico y tipo de formación de roca, la cual consiste en aumentar en decenas, unidades de mil y decenas de mil los valores en cada imagen respectivamente sin modificar los valores de las clases en la serie temporal térmica con el fin de conservar el formato de unidad. Este proceso se hace utilizando el Álgebra de Mapas en ArcGIS y permite realizar, posteriormente, sumatorias y cruces entre cada día térmico y la variable específica. Por ejemplo: para analizar la influencia de la componente vegetal en el comportamiento térmico basta con cruzar espacialmente la imagen de coberturas con las imágenes LST; sin embargo, dado que ambas imágenes contienen clases con los mismos valores de histograma el análisis requiere una diferenciación entre clases, si esto no se hace la intersección entre pixeles que arroja un valor 5 puede describir un cruce de clases 1-4, 2-3, 5-0, etc., entre temperatura y coberturas respectivamente, es por esto que al aplicar un factor multiplicador de decena a la imagen de coberturas la intersección con la serie térmica se definen con claridad las clases involucradas, ya que un valor 66 define un pixel con Bosque Caducifolio con una

temperatura de 31-45°C. De esta forma se obtienen los nuevos valores de atributo que representan las intersecciones entre las clasificaciones iniciales y que facilitan el posterior análisis de resultados, la Tabla 7 muestra la reclasificación de los valores iniciales y asigna la descripción de entorno para cada variable espacial.

Tabla 7. Reclasificación para valores de variables de estudio

Temperatura			Cobertura Superficial		Tipo de Roca		Período Geológico	
Valor	Descripción de clase		Valor	Descripción de clase	Valor	Descripción de Clase	Valor	Descripción de Clase
	Rango (°C)							
1	(-)/ND	0	0	Agua	10000	Sedimentaria	1000	Paleógeno
2	1	10	10	Hierbas/Cultivo de cereales	20000	Metamórfica	2000	Pérmico
3	11	20	20	Arbustos	30000	Intrusiva	3000	Cuaternario
4	21	25	30	Cultivos de hoja ancha	40000	Volcano sedimentaria	4000	Triásico
5	26	30	40	Sabana	50000	Volcánica	5000	Cretácico
6	31	45	50	Bosque Latifoliado			6000	Neógeno
			60	Bosque Cadutifolio			7000	Devónico
			70	Bosque Aciculado			8000	Carbonífero
			80	Bosque Caducifolio-Aciculado			9000	Jurásico
			90	Sin vegetación				
			100	Urbano				

Este proceso de intersección entre la imagen de la componente litológica o tipo de roca y las diferentes imágenes de la serie térmica permite obtener 6 imágenes, visualmente sin variaciones, con 30 clases que indican donde y cuando una clase térmica ocupa un tipo específico de roca; de igual forma se genera la intersección de la serie térmica con las imágenes de coberturas superficiales y periodos geológicos donde se obtienen 55 y 51 clases respectivamente analizadas bajo la misma condición térmica de la intersección litológica; en este proceso se obtienen igualmente 6 imágenes con contenido térmico y de cruce específico por variable, generando una muestra serial para cada conjunto de intersección donde se destaca la generación y variación de clases necesarias para el análisis detallado del comportamiento térmico superficial. En el proceso de análisis sólo se tendrá en cuenta la variación térmica por intersección referente a las clases 4 (en función de la ubicación anómala), 5 y 6 de la variable *temperatura*, debido a que son las clases térmicas que describen la variación anómala en la región de estudio durante la serie temporal de interés.

6.7. VALIDACIÓN DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL

Con base en el desarrollo sintetizado en la ecuación 5 por Castro (2009), el proceso de validación para las tendencias térmicas, obtenidas del producto MOD11A1 en este estudio, se apoya en la teoría de correlación superficial y se condiciona al registro térmico del aire mediante el cálculo de coeficientes de correlación térmico en cada una de las estaciones climatológicas presentadas en la Tabla 6, coincidentes con las fechas de captura en la serie de imágenes LST. Este proceso consiste básicamente en tabular el dato térmico registrado en cada estación climatológica y el obtenido en la imagen satelital en la misma ubicación geográfica para una fecha específica; en este caso se toman los datos registrados en ambas fuentes para los días 20, 21, 24, 27, 28 de febrero y 2 de

marzo y se realiza el proceso de correlación. En la Tabla 8 se presentan los datos correspondientes a cada imagen y estación para cada fecha en la serie temporal de análisis.

Tabla 8. Registro térmico por ubicación de estación climatológica durante el periodo de análisis

Ubicación Geográfica según Estación	Temperatura según Instrumento de Medición											
	Satélite (°C)						Estación Climatológica ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)					
	20-feb	21-feb	24-feb	27-feb	28-feb	02-mar	20-feb	21-feb	24-feb	27-feb	28-feb	02-mar
Valdivia	17	13	18	16	24	12	21.6	20.0	29.0	24.0	28.8	18.7
Temuco	18	16	27	25	31	10	22.6	17.7	31.9	29.6	31.5	23.2
Los Ángeles	23	28	31	28	25	17	26	26.4	33.2	31.8	29.9	23
Concepción	26	25	29	26	17	20	22	20	22.6	21.5	15.8	21.4
Chillán	25	28	33	30	31	21	26	28	30	31	31	23.4
Curicó	26	30	30	32	29	22	28.8	29.8	29.8	31.2	26.8	25.8
Santo Domingo	28	26	25	25	26	30	21.9	19.6	19.0	19.8	19.4	23.8
Tabalaba	35	35	33	28	33	26	30	28	27	22	27.2	24.4
Quinta Normal	38	35	34	37	30	28	31.4	28.6	27.4	30.4	26.2	25.8
Pudahuel	37	41	36	32	28	28	30.2	31.6	30.3	27	25.7	25.6
Rodelillo	30	28	23	26	22	31	26	21	18	18	20.2	23.8
La Serena	27	30	31	35	35	37	19.5	20.2	20.5	21.3	21.6	24.2

LAADS de la NASA; Dirección Meteorología de Chile; TuTiempo.com

Las fechas de prueba corresponden únicamente al intervalo de imágenes LST con cambios y variaciones anómalas seleccionadas para el análisis de variación espacial, ya que sobre este intervalo se realiza el proceso de identificación de tendencias y relación de variables superficiales con la respuesta térmica anómala.

Otro aspecto relevante dentro del proceso de validación en la identificación de la anomalía térmica lo constituye el sentido de las pendientes en las gráficas TVC. Dado que estas gráficas se elaboran a partir del promedio histórico de las fechas en la serie de análisis y el dato diario, el cambio de sentido en las pendientes de regresión lineal indica aumentos térmicos superiores a los máximos de tendencia registrados en lugares específicos afectados geográficamente.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Mediante el archivo histórico de temperatura registrado por las estaciones climatológicas en tierra, se logra establecer la tendencia térmica del conjunto e identificar y visualizar el día más representativo sobre distribución de los diferentes rangos de temperatura entre la zona de estudio; es así como en función de la dispersión de datos se establece que el día 19 de febrero con un $R^2=0.828$ respecto a la media del conjunto, es el día que mejor representa el registro térmico para el periodo de estudio en el año 2010. Este dato se utilizó como partida y fecha guía en el análisis espacial de las imágenes con contenido LST y las componentes litológicas y de coberturas superficiales.

El capítulo de resultados está conformado por dos líneas de análisis que parten de la dinámica superficial térmica y que la explican como una condicionalidad del entorno geológico y vegetal que comprende el territorio de manifestación anómala durante las proximidades del sismo en Cauquenes. A continuación se presentan en detalle los resultados obtenidos en cada uno de los procesos de intersección de variables espaciales y de comportamiento térmico superficial como una secuencia discreta de cambios espaciales para las fechas 21, 22, 24, 27, 28, 29 de febrero y 2 de marzo de 2010.

7.1. VARIACIÓN TÉRMICA SUPERFICIAL EN FUNCIÓN A LA FECHA DEL SISMO

Los registros térmicos obtenidos de las estaciones climatológicas y el satélite TERRA permiten identificar una variación irregular de temperatura durante las fechas próximas a la ocurrencia del sismo del 27 de febrero en 2010, donde el aumento térmico ocupó una amplia zona en el sector central de Chile que comprende las regiones de Maule, Biobío y Araucanía principalmente. Los gráficos TVC soportan un cambio significativo en los registros térmicos del aire y presentan pendientes de regresión lineal opuestas a las de la tendencia histórica para algunas estaciones, lo cual indica que el comportamiento anómalo no alcanzó ciertas estaciones o no se propagó a ciertas regiones geográficas. Esta condición es evidenciada espacialmente mediante la obtención pixel a pixel del registro LST de las imágenes MODIS y el cual permite ubicar espaciotemporalmente la dinámica de la variación anómala térmica respecto a la geografía local. Estos resultados se especifican en los siguientes ítems.

7.1.1. Comportamiento LST y clasificación térmica en la identificación de rango anómalo temporal

Las imágenes con información térmica obtenidas, mediante la aplicación de la ecuación 9 para la banda 1 del producto MOD11A1, generan una secuencia temporal que permite identificar que la serie de estudio durante el año 2009 no presentó ningún cambio que señalara una variación anómala de LST para la zona de referencia y análisis en el sismo del 27 de febrero de 2010 (Figura 30). Con eso se establece que durante el 19 de febrero al 2 de marzo de 2009 la tendencia térmica de la región registró valores LST sin ninguna variación que indicara el inicio de una dinámica térmica superficial de tendencia positiva sobre el perfil térmico de la zona y sin aumentos progresivos y continuos.

Nota aclaratoria: La totalidad del conjunto cartográfico presentado en el capítulo de Resultados es preparado directamente por el autor, con base en la información y datos obtenidos de en las diferentes fuentes consultadas descritas en el capítulo de Materiales y Equipos.

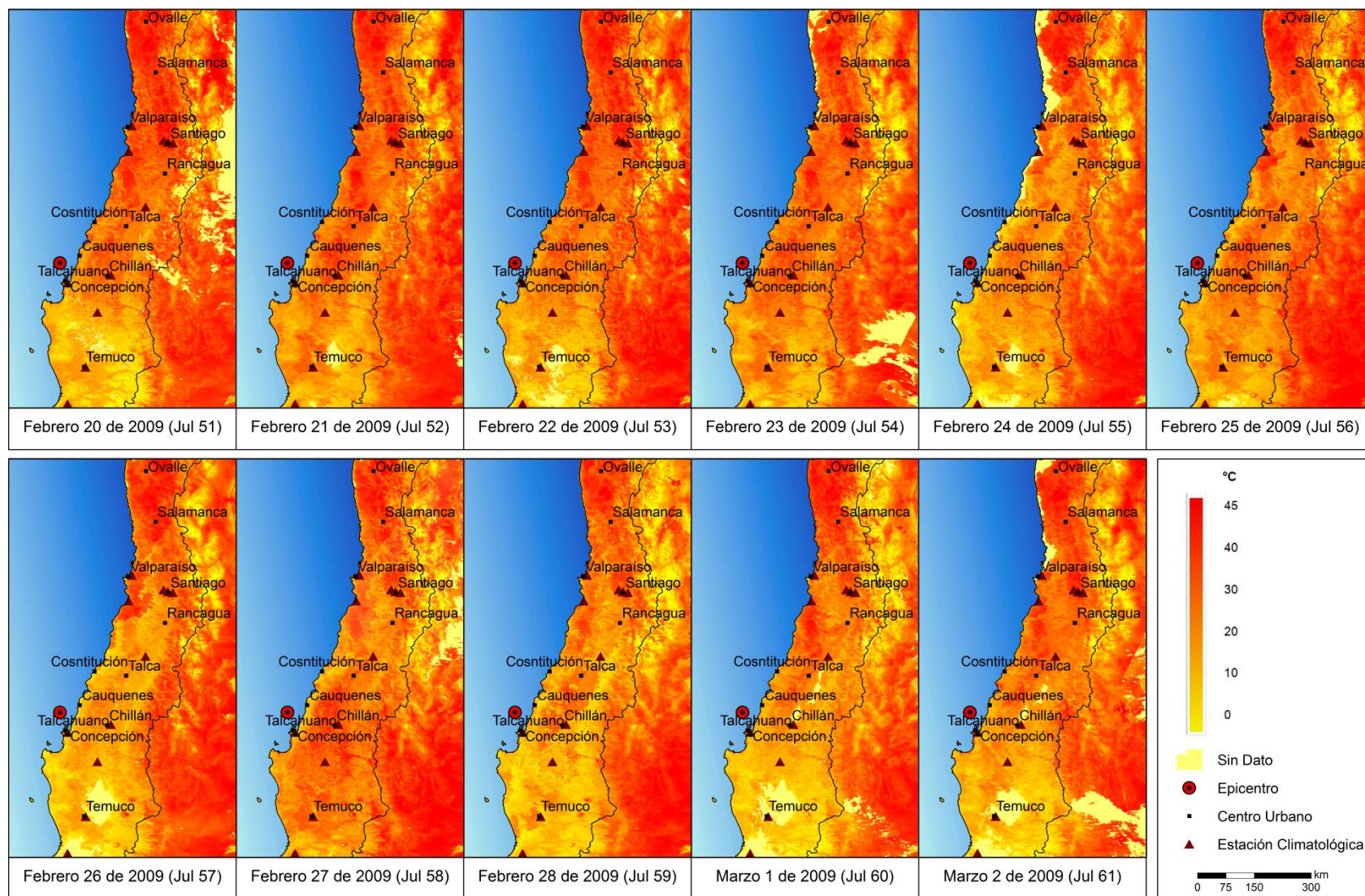


Figura 30. Comportamiento térmico registrado en la zona de estudio entre febrero 20 a marzo 2 para el año 2009.
Primer serie de análisis LST.

A diferencia de la tendencia térmica superficial registrada en el 2009, en el 2010 se presenta una variación que registra una dinámica de ascenso térmico y una posterior normalización de los valores LST respecto a la tendencia térmica normal regional. El primer cambio térmico superficial es notorio sobre el sector de Chillán el 21 de febrero, propagándose en dirección sur hacia Temuco y la Península de Arauco hasta el 24 de febrero con aumentos continuos que definen una zona de afectación térmica, la cual se acentúa tras el descenso térmico que presenta la imagen LST del 25 de febrero y que se regulariza espacialmente durante los primeros días del mes de marzo (Figura 31).

Estas imágenes presentan el conjunto de tendencia anómala térmica en la región de estudio y permiten definir cambios térmico-superficiales diferenciables los días 21, 24, 27 y 28 de febrero, los cuales enmarcan el registro de picos máximos y mínimos de variación LST antes de la ocurrencia del sismo y durante la normalización térmica de la zona. Con base en las imágenes de estas fechas, la reclasificación térmica permite demostrar que los días anteriores al 21 de febrero registran tendencias de cubrimiento térmico similares entre sí y que para el 21 de febrero el cambio térmico describe el inicio de un aumento con tendencia positiva espacial hasta llegar al máximo cubrimiento y registro térmico el día 24 de febrero, que después presenta una tendencia de reducción mínima de la serie el 27 de febrero y logra un primer indicio de regularización térmica el 2 de marzo (Juliano 61). La Figura 32 presenta la variación y dinámica espacio-temporal de las clases térmicas que permiten ubicar la afectación anómala LST durante el sismo del 27 de febrero de 2010.

El proceso de reclasificación de las imágenes térmicas para el año 2010 permite aproximar el resultado LST a la clasificación climática caracterizada en la Figura 28(b), donde la generalización por ambientes climáticos en cada región administrativa enmarca un entorno térmico bajo registros máximos de temporada. De esta forma al comparar la distribución térmica de la Figura 28(b) con la imagen reclasificada para el 20 de febrero en la Figura 32, se puede indicar que el resto de imágenes en la serie de análisis presentan un comportamiento térmico con registros de variación que alteran la condición climática de la zona. La reclasificación térmica permitió aislar el rango anómalo y su cubrimiento espacial, indicando geográficamente los lugares de afectación y el avance de tal anomalía sobre los sectores de la Cordillera de la Costa y la Depresión Central. Una observación que requiere de un nuevo enfoque y análisis, la constituye el descenso térmico registrado entre Valparaíso y Rancagua, ya que climática y geográficamente se esperaba que la tendencia térmica fuera constante o similar como entre Talca y Valparaíso debido a que fueron sectores opuestos a la dirección de propagación de la anomalía térmica.

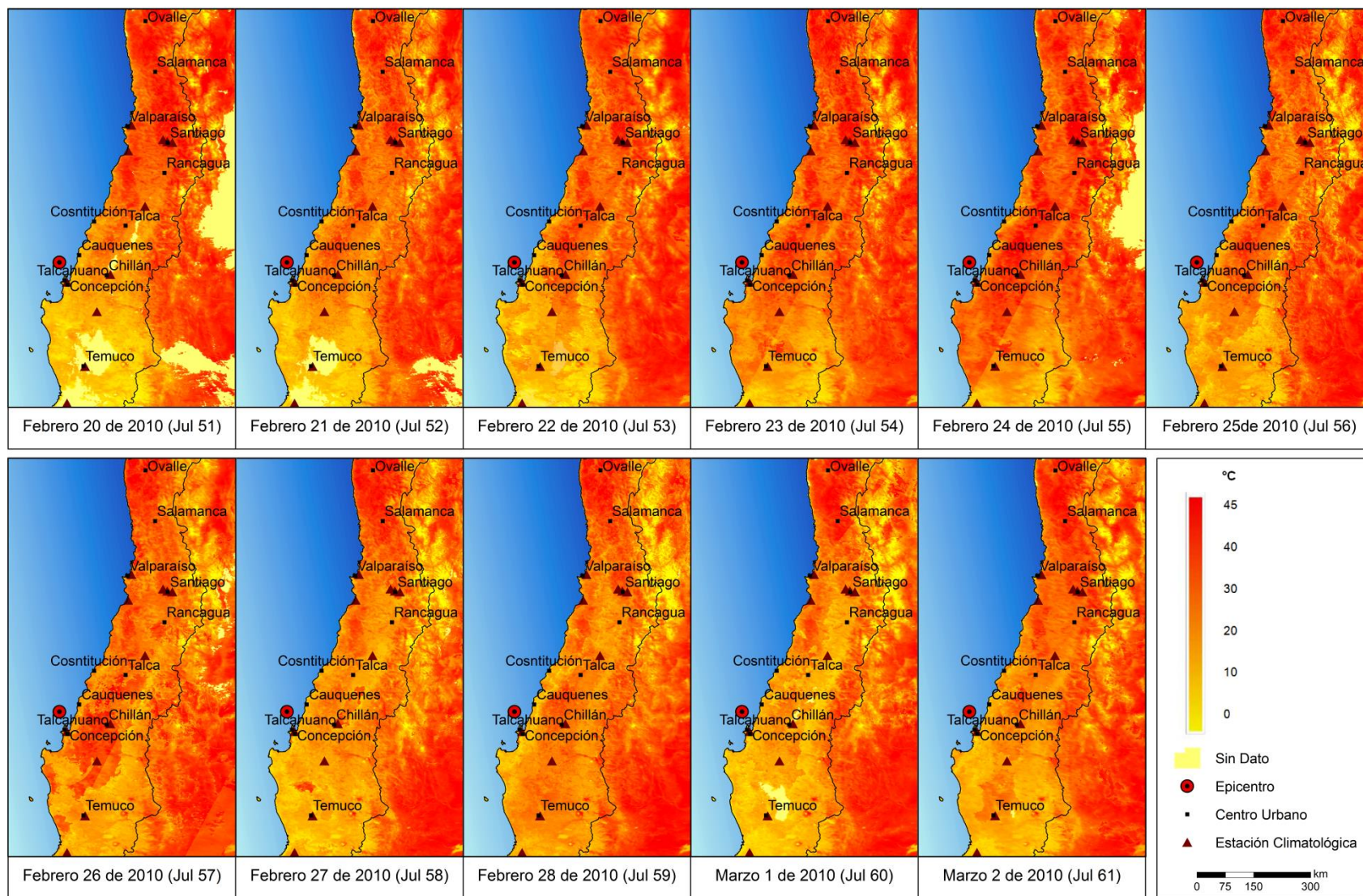


Figura 31. Comportamiento térmico registrado en la zona de estudio entre febrero 20 a marzo 2 para el año 2010.
Primer serie de análisis LST.

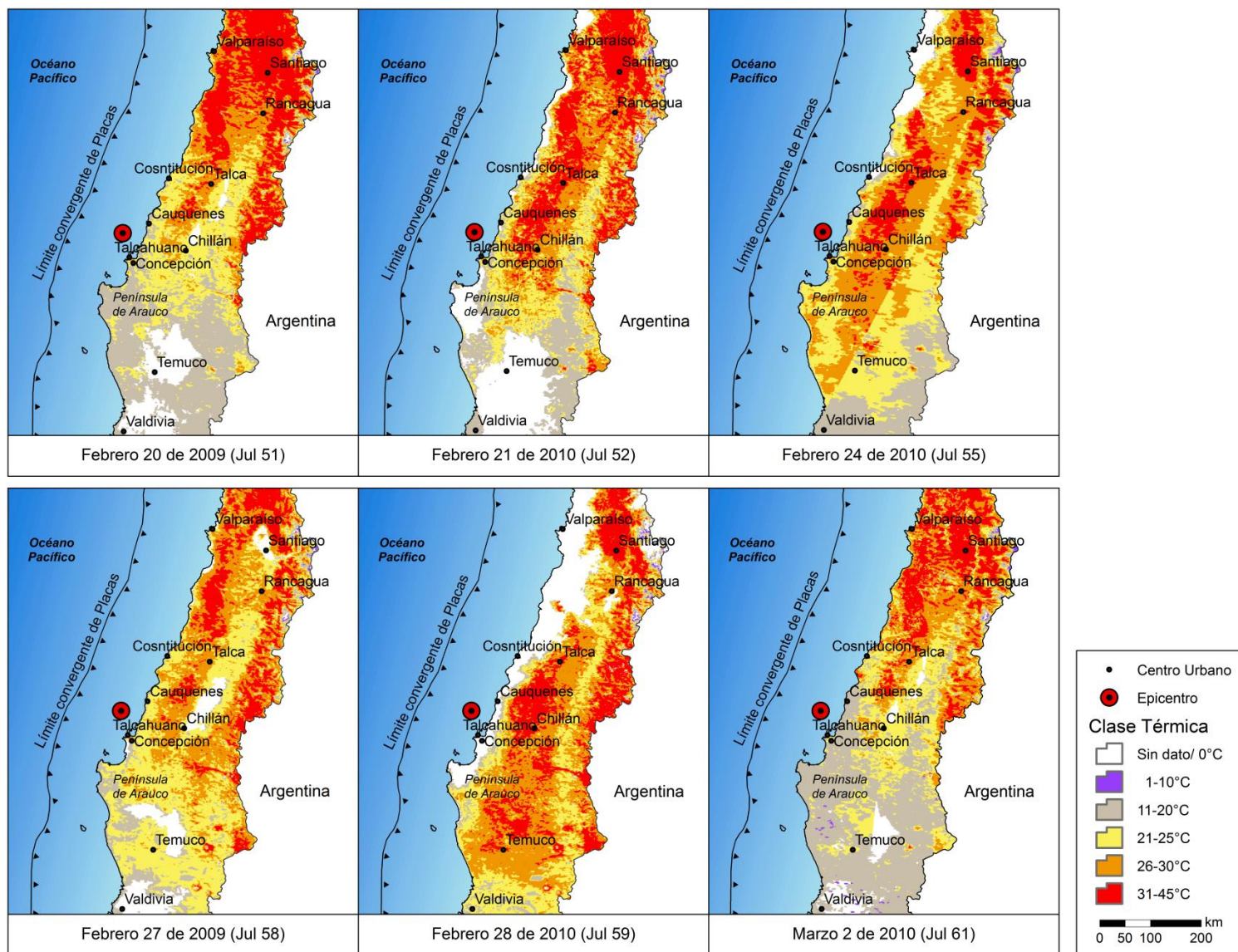


Figura 32. Comportamiento térmico en serie de análisis temporal bajo clasificación por rangos térmicos específicos.

A partir de las imágenes de la reclasificación térmica se elabora la Tabla 9 donde se presentan las áreas ocupadas por cada clase térmica durante la serie temporal de análisis, estableciendo de esta forma los datos necesarios para detallar la dinámica espacial que presentó la manifestación anómala LST en la zona de estudio. Estos datos son correlacionados teniendo en cuenta el cubrimiento LST diario por clase y permiten verificar la fecha de normalización y máxima variación térmica, mostrando cuantitativamente el área total de anomalías diarias en LST y su variabilidad por avance temporal respecto a la comparación de las áreas obtenidas el 20 de febrero, establecidas como cifras base.

Tabla 9. Registro LST en km² bajo clasificación térmica regional para análisis de tendencias y comportamiento térmico superficial en serie temporal 2010.

Clase Térmica	Rango Térmico (°C)	Área en km ² por clase térmica (± 0.25 km ²)					
		feb-20	feb-21	feb-24	feb-27	feb-28	mar-02
1	N-0	9375	17871	4207	8882	15574	5600
2	01-10	109	276.75	154.75	153.5	272	142
3	11-20	27487	15929	15298	8773.3	4895.3	33934
4	21-25	22604	19529	30626	36543	21451	22604
5	26-30	18657	24728	35750	30806	36318	19077
6	31-45	21046	20944	13243	14119	20767	17921

El proceso de correlación en la Tabla 9 arroja un coeficiente de 0.96 entre los días 20 de febrero y 2 de marzo (Julianos 51 y 61), indicando al día 20 de febrero como el último día de tendencia térmica regular antes de la ocurrencia del sismo del 27 de febrero (Juliano 58), y al 2 de marzo como el día que contiene la tendencia de regularización térmica en la región; así mismo se presenta un coeficiente inverso de -0.93 entre el 24 y 27 de febrero que indica el descenso térmico y la redistribución espacial de la anomalía LST a clases menos cálidas, y otros coeficientes que hacen relación a la variabilidad e incomparabilidad entre imágenes de la serie de análisis.

Los datos en ésta tabla permiten establecer que en el intervalo de análisis se alcanzó el máximo de variación superficial anómala con 79618 ± 0.25 km² el día 24 de febrero (Juliano 55) con un aumento de 17311 ± 0.25 km² respecto a la fecha de iniciación de la serie para las clases térmicas 4, 5 y 6; tal incremento se establece respectivamente en 15 y 23.4% para los días 21 y 24 de febrero sobre el área inicial ocupada por las clases 5 y 6, presentando una linealidad positiva de regresión con $R^2=0.97$. La clase 4 en la zona sur donde se visualiza el mayor aumento térmico aporta 8022 ± 0.25 km² de variación térmica positiva entre las localidades de Chillán y Temuco, localizando la región de mayor aumento térmico con cerca de 5000 km² entre el triángulo conformado por las localidades de Cauquenes, Talca y Chillán donde se alcanzan temperaturas máximas del suelo de 39.79°C. Pasado el día 24 de febrero la anomalía térmica máxima comienza a presentar variaciones y pérdidas espaciales, mostrando una disminución de 4067.3 ± 0.25 km² sobre el área ocupada por las clases 5 y 6 al llegar a la fecha del evento sísmico; es decir que la zona con el mayor incremento presentó pérdidas térmicas entre 5 a 15°C. Sin embargo, dicha área se redistribuyó principalmente a la clase 4 donde se registran temperaturas de 21-25°C conservando una zona de aumento cercana a 4°C entorno a la anomalía

principal. Las variaciones espacio-temporales se soportan en el diagrama de barras de la Figura 33.

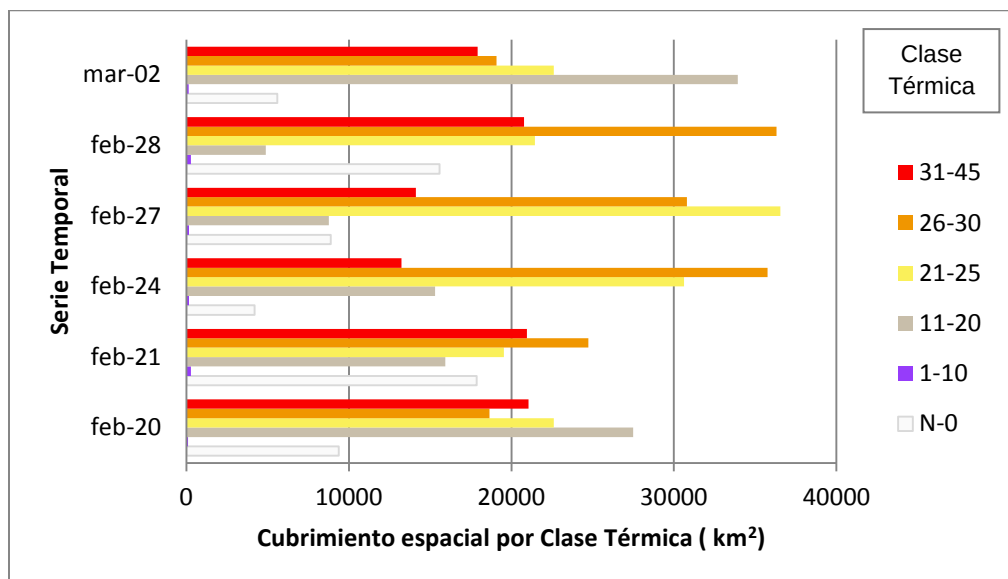


Figura 33. Distribución de variaciones LST por clases térmicas

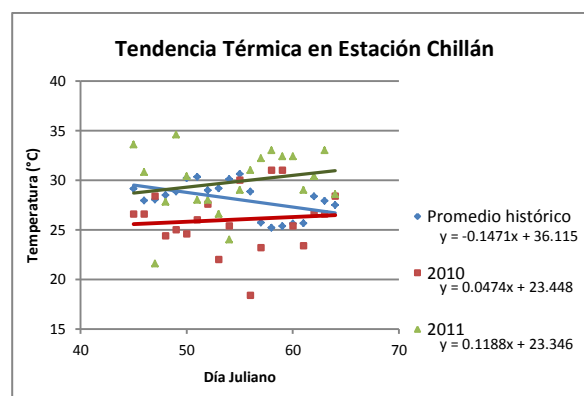
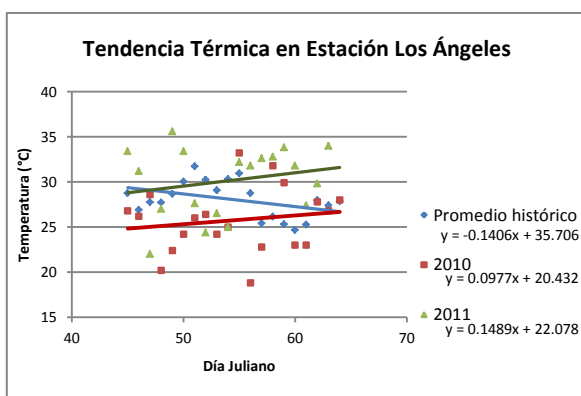
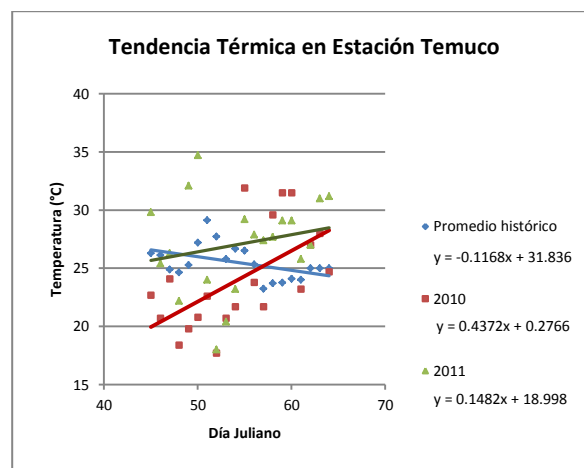
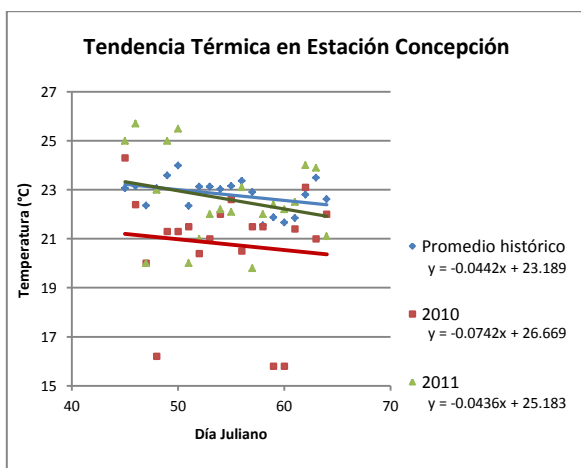
La Figura 33 presenta, a partir de los datos en la Tabla 9, la distribución térmica y relaciona el área que cada una de las clases ocupa durante cada día de análisis. Esta figura permite visualizar cómo el coeficiente de correlación en el comportamiento térmico para los días 24 y 27 de febrero de 0.93 es inverso; es decir, mientras que el área de anomalía térmica el 24 de febrero se trasladaba desde las clases más frías a las más calientes el 27 de febrero ocurría lo contrario, las clases de mayor valor térmico cedían un área de $4076 \pm 0.25 \text{ km}^2$ a las más frías presentando una disminución de $\pm 5^\circ\text{C}$ y la primer tendencia de regularización térmica para toda la zona de estudio. Un día después del sismo (Juliano 59) la variación térmica alcanza los valores máximos de toda la serie temporal con registros de 41.19°C y el mayor cubrimiento anómalo en la región presentando un aumento en áreas anómalas de $8092 \pm 0.25 \text{ km}^2$ aunque de menor intensidad después de haber evidenciado un comportamiento de máximo y mínimo antes del evento. Luego de esta tendencia, las clases térmicas describen una regularización espacial el día 2 de marzo donde la zona de variación anómala es incluida dentro de las clasificaciones de temperaturas bajas con valores máximos de 20 o 25°C , presentando normalidad térmica respecto al cubrimiento regular para las clases térmicas de análisis; es decir, que el comportamiento térmico se hace comparable con otras imágenes térmicas de tendencia regular para el sector. Este resultado de varios picos máximos durante fechas cercanas al evento, antes o después, se ajusta teóricamente a lo presentados en el marco teórico y referencial.

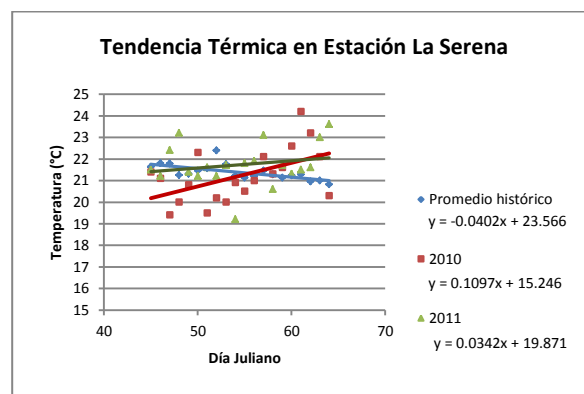
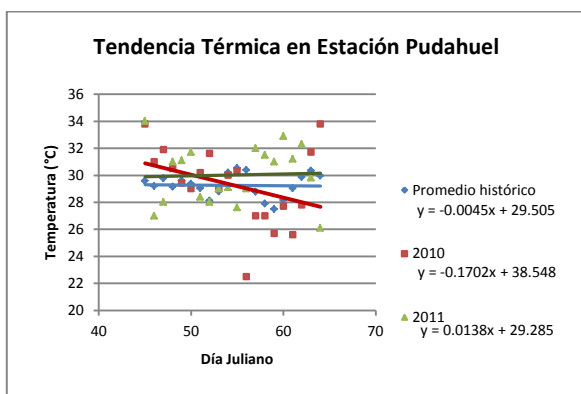
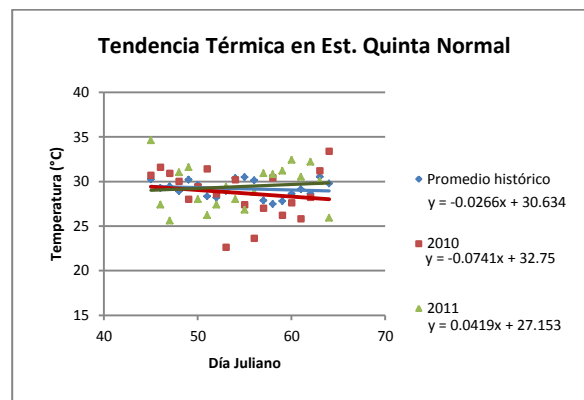
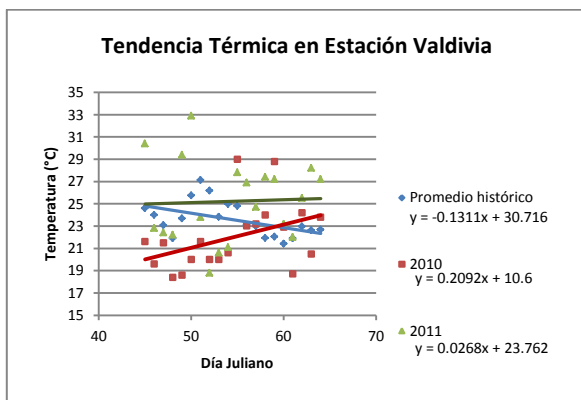
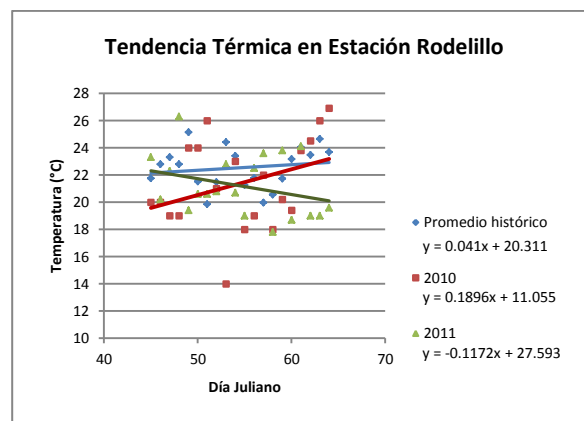
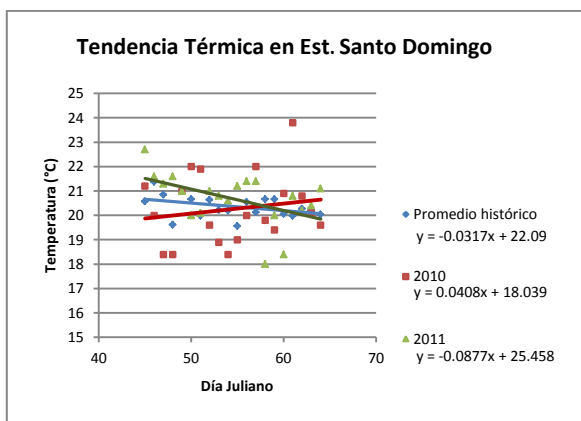
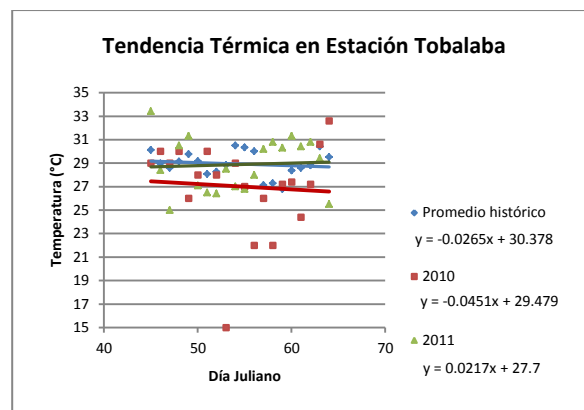
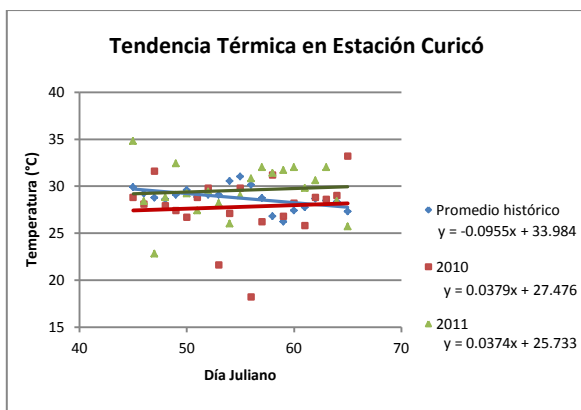
7.1.2. Gráficos de variación (TVC) y tendencia térmica en estaciones climatológicas de la base temporal.

La distribución espacial de las diferentes estaciones climatológicas permite un primer acercamiento sobre los cambios térmicos que se presentaron una semana antes del evento sísmico, ya que las estaciones de Chillán, Los Ángeles, Curicó, Temuco y Pudahuel indicaban que en el sector que comprende la Depresión Central se registraban temperaturas con aumentos alrededor de los 7°C respecto a la condición normal térmica

de la zona. Para cada una de las estaciones, las gráficas TVC destacan el sentido en la pendiente de regresión lineal del conjunto de datos donde se presenta una serie de tendencia histórica, una de tendencia sísmica o durante el periodo de ocurrencia y otra particular al año posterior al evento. Con esto se logra identificar cuándo y dónde la variación térmica alcanzó registros superiores a la tendencia histórica ya que el cruce entre líneas de regresión o cambios en el sentido de la pendiente de regresión indican cambios térmicos importantes. Las tres tendencias térmicas en las gráficas TVC permiten resaltar la afectación térmica ocasionada en el aire por los efectos térmicos de desgasificación y flujos de calor durante la preparación cortical al sismo del 27 de febrero donde, para la mayoría de estaciones, el cambio o variación térmica no es frecuente en el mismo periodo del año.

Los siguientes gráficos presentan las tendencias térmicas por cada estación climatológica en la zona de estudio y contienen las pendientes de regresión lineal para cada conjunto de datos así como la ecuación de pendiente de los mismos y una representación temporal en días Julianos.





Estos gráficos permiten evidenciar que para las estaciones de Concepción y Tobarra los registros térmicos en 2010 presentaron una tendencia similar a la histórica aunque de menor magnitud; es decir, se presentó la misma tendencia de decadencia térmica que para las fechas del 27 de febrero en otros años se considera normal con $\pm 3^{\circ}\text{C}$ de diferencia. Las estaciones de Pudahuel y Quinta Normal presentaron una tendencia inversa a la histórica; es decir, la ubicación geográfica de estas estaciones permite que el registro climático tienda a aumentar durante esa época del mes, sin embargo durante la proximidad del sismo la decadencia térmica fue notoria aunque con iguales picos máximos al final de la serie de análisis; registros opuestos fueron los presentados en las estaciones de Chillán, Los Ángeles, Temuco y Valdivia donde los cambios térmicos fueron los mayores con relación al sentido en la pendiente de la tendencia histórica; el comportamiento térmico en las estaciones La Serena y Rodelillo fue similar al de éstas últimas, sin embargo no se encuentran dentro de la zona que presentó la anomalía LST. Las estaciones de Curicó y Santo Domingo presentaron el menor aumento térmico por variación climática debido a que geográficamente se ubican sobre zonas más cálidas y cercanas a la zona anómala.

Para generar una referencia de variación espacial y afectación por localización geográfica de los resultados en ambos instrumentos de medición se elabora la Figura 34. En esta figura se sintetizan los resultados y puntos de referencia en la identificación del alcance anómalo LST para la serie de análisis, ya que al aislar el rango anómalo en la dinámica térmica y su cubrimiento espacial se indica geográficamente los lugares de afectación comunes para los datos capturados por el satélite Terra y las diferentes estaciones climatológicas en Chile central.

La Figura 34 permite visualizar en función del tiempo cómo el aumento térmico y espacial anómalo para LST afectaba progresivamente los registros que se obtuvieron de las estaciones climatológicas, generando una afectación compartida y mutuamente incluyente geográficamente. Para el 21 de febrero el avance térmico anómalo afectaba principalmente las estaciones de Chillán y Los Ángeles, este avance alcanza la estación de Temuco y parte de la Península de Arauco el 24 de febrero y luego se contrae hasta el sector intermedio entre las estaciones de Chillán y Los Ángeles el 27 de febrero; después del sismo, el 28 de febrero la anomalía térmica en LST vuelve a presentarse y con mayor intensidad espacial incluyendo en su área de variación, desde las localidades de Curicó hasta Valdivia, las estaciones de Curicó, Chillán, Los Ángeles, Temuco y en menor afectación la de Valdivia. La Figura 34 también permite evidenciar que las estaciones de Pudahuel y Quinta Normal presentaron una tendencia inversa a la histórica. Los archivos históricos generados para las estaciones climatológicas permiten verificar tales cambios espacialmente.

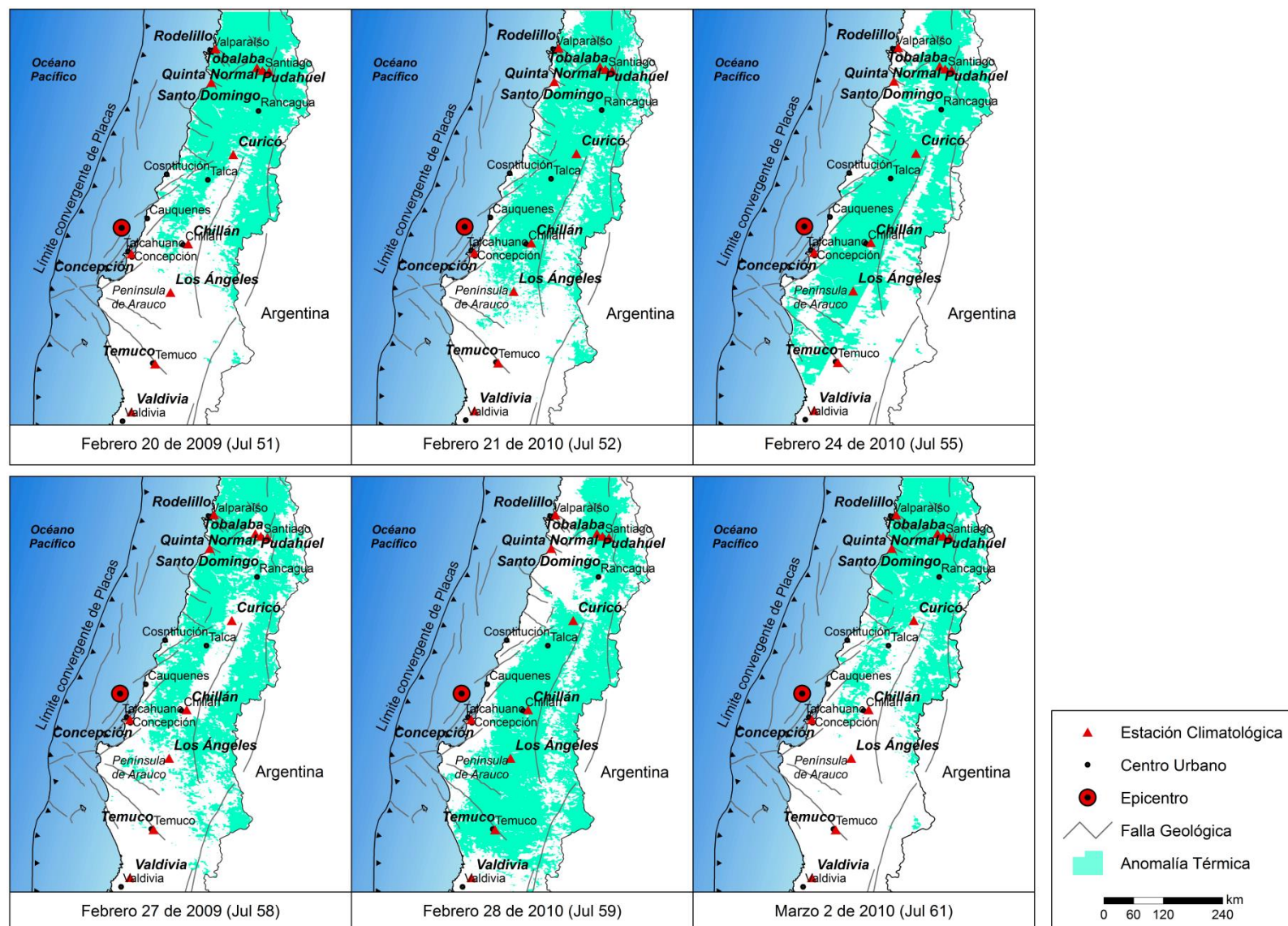


Figura 34. Afectación térmica por dinámica LST en las diferentes Estaciones Climatológicas presentes en la zona de estudio.

7.2. DINÁMICA DE LA ANOMALÍA TÉRMICA RESPECTO A LA UBICACIÓN GEOGRÁFICAS DE LAS VARIABLES SUPERFICIALES

Mediante el cruce de variables superficiales, las series generadas presentan imágenes con un comportamiento regular que facilita su análisis por medio de los valores de clasificación en cada una de las tablas de atributos, los cuales son descritos en la Tabla 7. Este proceso de intersección permitió identificar que la variación térmica anómala durante el sismo se vio influenciada y controlada por determinadas estructuras geológicas y vegetales, detallando el tipo de escenario y estableciendo confiabilidad en las bases teóricas que describen el fenómeno térmico. La Figura 35 presenta la muestra serial de cada variable superficial obtenida en la intersección con el conjunto de imágenes LST y tiene como objetivo indicar la diferenciación de clases que genera cada variable, los colores presentados en cada muestra no representan una categorización específica de la anomalía térmica registrada.

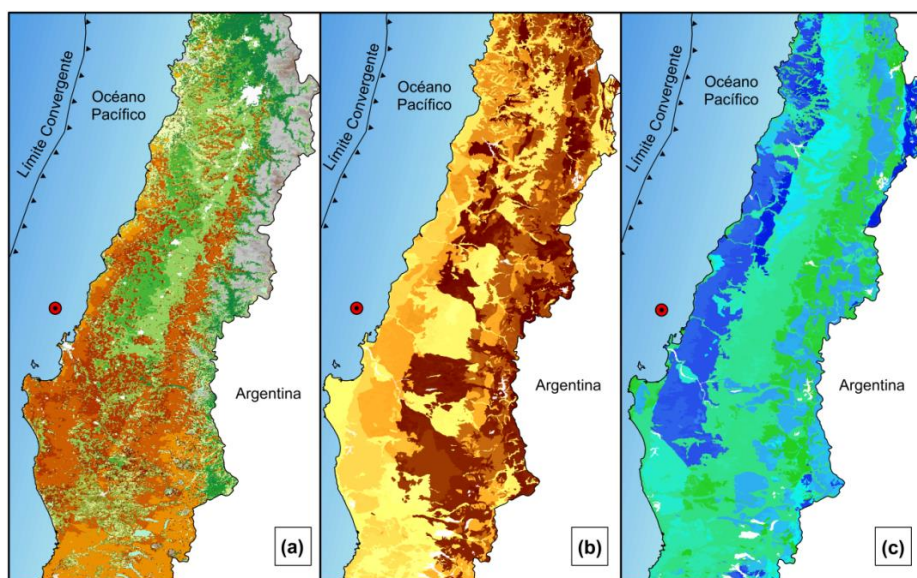


Figura 35. Muestra serial obtenida en el proceso de intersección entre variables superficiales y la serie térmica. (a) resultado de serie para coberturas superficiales, (b) resultado de serie para componente litológica, (c) resultado de serie para periodos geológicos.

A continuación se describe y explica la relación o influencia que cada variable superficial aportó a la dinámica térmica anómala durante el sismo de Cauquenes en 2010, detallando el avance o reducción identificado en cada escena.

7.2.1. Comportamiento térmico en función de la geología regional

La Figura 36 presenta la dinámica anómala térmica respecto a la localización geográfica de las diferentes estructuras litológicas en la región de estudio y permite identificar, mediante el proceso de intersección entre el raster litológico, la capa vectorial de fallas geológicas y la serie de imágenes térmicas, que la variación térmica anómala inicialmente aparece al margen izquierdo de la Falla Liquiñe-Ofqui el 21 de febrero sobre rocas volcánicas y sedimentarias ocupando áreas de 2766 y $3666 \pm 0.25 \text{ km}^2$ respectivamente, direccionándose en sentido sur sobre el mismo tipo de material y conservando la ruta trazada por dicha falla.

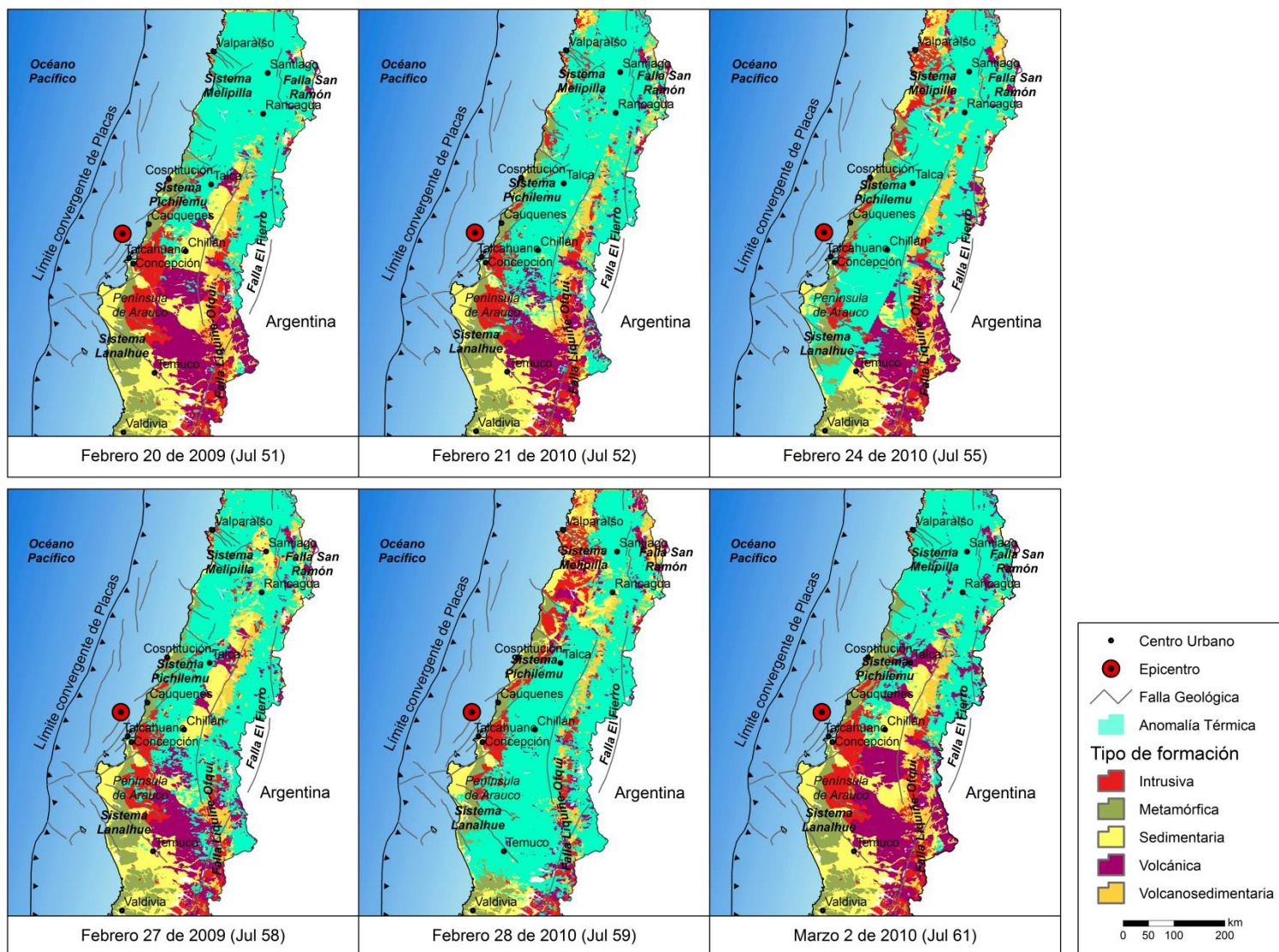


Figura 36. Distribución de la anomalía térmica (cian) sobre la componente litológica y sistemas de fallas geológicas (línea roja) en la zona de estudio.

De esta forma la Figura 36 permite establecer que: el 24 de febrero, cuando la variación térmica alcanza el registro máximo antes del evento sísmico, la anomalía se propaga hasta el sector de Temuco cubriendo parte del margen ocupado por material metamórfico en el litoral y muestra como en la península de Arauco, aunque se localiza el sistema de fallas geológicas Lanalhue, las rocas intrusivas y metamórficas son levemente cubiertas por la anomalía mientras que el material sedimentario es totalmente cubierto. El 27 de febrero el cubrimiento espacial para la anomalía se redujo en un 67% y ocupó la zona baja de la derivación del sistema Liquiñe-Ofqui, mostrando la primera tendencia de aumento hacia el flanco derecho de la falla principal donde se localizan rocas de tipo volcano sedimentarias principalmente. Después de presentar la variación esperada de aumento y disminución térmica espacial antes del sismo, el 28 de febrero el registro térmico vuelve a presentar coberturas máximas sobre las rocas sedimentarias y volcánicas con áreas de 6168 y $10038 \pm 0.25 \text{ km}^2$ respectivamente, en esta fecha es notorio el cubrimiento en rocas metamórficas e intrusivas que antes presentaban variaciones mínimas en la zona más externa de cada unidad. Hacia el día 2 de marzo y bajo la normalización térmica de la región la componente litológica toma valores de histograma similares a los del día 20 de febrero.

La Tabla 10 contiene los datos de variación espacial en kilómetros cuadrados que ocupó cada clase litológica durante la serie de análisis y cuya dinámica permite corroborar cómo ciertas estructuras permitieron que la variación anómala LST se propagara e interactuara entre los diferentes tipos de rocas en la zona de estudio. De esta forma se precisa que para el 24 de febrero, día en el cual se registra el mayor aumento térmico superficial, la clasificación litológica también registra la mayor variabilidad entre clases y presenta a las de tipo sedimentario, metamórfico, intrusivo y volcánico con aumentos entre el 35 y 83% respecto al área anómala cubierta para el día 20 de febrero por cada clase; en éste día el material sedimentario y volcánico registró aumentos espaciales de 5134 y $3291 \pm 0.25 \text{ km}^2$ contenidos principalmente en el rango térmico de $26\text{-}30^\circ\text{C}$, la cuarta parte del área anómala en estos materiales presentó temperaturas superiores a los 30°C . El 27 de febrero la anomalía LST pierde más de 4000 km^2 respecto al área total en el día 24 de febrero y las clases de rocas sedimentarias y metamórficas presentan la mayor disminución por cubrimiento térmico con una reducción superficial de $6128 \pm 0.25 \text{ km}^2$ donde más de 1250 km^2 entran al rango térmico de $26\text{-}30^\circ\text{C}$; es decir, que ésta área disminuyó su LST en más de 5°C , de tal forma que la redistribución térmica ocupó las clases intrusivas y volcano sedimentarias cercanas al sistema de falla Liquiñe-Ofqui. Para el día 28 de febrero, con base al día anterior, el área total anómala aumenta $12107 \pm 0.25 \text{ km}^2$ distribuidos principalmente sobre rocas de tipo sedimentario, volcánico y metamórfico y presentan para éstas los mayores incrementos en toda la serie de análisis.

Tabla 10. Datos de variabilidad y dinámica superficial (km^2) entre la anomalía térmica y la componente litológica en la zona de estudio.

Tipo de Roca	Área en km^2 por anomalía térmica ($\pm 0.25 \text{ km}^2$)				
	Febrero 20	Febrero 21	Febrero 24	Febrero 27	Febrero 28
Sedimentaria	10884.5	14550.5	16018.5	10654.25	17052.75
Metamórfica	640.5	681.75	1825.75	1061.75	2356
Intrusiva	7472	7924.5	8678.75	9617.75	7304.75
Volcano sedimentaria	11386.5	10390.5	9795.5	11263.5	10932.5
Volcánica	9202.75	11968.5	12494	12182.25	19240.75
Área Total por día	39586.25	45515.75	48812.5	44779.5	56886.75

7.2.2. Comportamiento térmico en función de las coberturas superficiales regionales

En la Tabla 11 se presentan los datos de variabilidad y la dinámica superficial de la anomalía térmica y las distintas coberturas vegetales identificadas en la zona de estudio, obtenidos del proceso de intersección y presentados en la Figura 37. Los cambios más representativos durante la serie de análisis se presentaron entre las coberturas de Hierbas/Cultivos de cereales y Bosque Latifoliado cuyo cubrimiento alcanzó variaciones máximas de 4589 y $6222 \pm 0.25 \text{ km}^2$ entre los días 20 y 21 de febrero y 20 y 24 de febrero respectivamente.

Para el día 21 de febrero las coberturas de Hierbas y Bosque Latifoliado presentaron aumentos considerables de 4589 y $1625 \pm 0.25 \text{ km}^2$, mientras que los suelos sin vegetación registraron una disminución de más de 1500 km^2 , disminución que permaneció relativamente constante durante la serie temporal. El 24 de febrero la región cubierta por Hierbas ocupó $19657 \pm 0.25 \text{ km}^2$ con una variación menor a 500 km^2 , la cobertura de Arbustos presentó una disminución de 1125 km^2 , el Bosque Caducifolio aumentó el 53% respecto al día 21 de febrero y el Bosque Aciculado registró un cubrimiento mayor en casi 5 veces al registro normal; así mismo la clase Bosque Latifoliado evidenció una ganancia en cubrimiento por anomalía LST cercana a los 4600 km^2 pertenecientes, casi en su totalidad, al rango térmico de $26\text{-}30^\circ\text{C}$; estas clases de bosque concentran el área anómala sobre la región interna que comprende la Cordillera de la Costa desde el sector de Constitución hasta Temuco en la Depresión Central.

El 27 de febrero, día en el que se desarrolla el evento sísmico, las coberturas representativas de Hierbas/Cultivos de cereales y Bosque Latifoliado muestran la mayor disminución después de presentar un aumento progresivo durante la serie temporal, ésta disminución equivale a cerca de 3000 y 2100 km^2 respectivamente en las regiones del Maule y Biobío; la cobertura Urbano presenta una pérdida superficial del 63% perteneciente al rango térmico que registra temperaturas superiores a 30°C , tal pérdida se redistribuye térmicamente con descensos de $10\text{-}15^\circ\text{C}$ sobre las localidades de Chillán, Concepción y Santiago, de esta forma se representa la mayor variabilidad o dinámica entre coberturas superficiales alcanzando un cubrimiento de $48609 \pm 0.25 \text{ km}^2$ hasta el día 27 de febrero. Sin embargo, el registro LST anómalo para el día 28 de febrero muestra aumentos significativos para todas las clases de coberturas, a excepción de Arbustos y Bosque Aciculado, presentando un cubrimiento espacial de $56468.25 \pm 0.25 \text{ km}^2$.

Tabla 11. Datos de variabilidad y dinámica superficial (km^2) entre la anomalía térmica y la componente de coberturas superficiales en la zona de estudio.

Cobertura Superficial	Área en km^2 por anomalía térmica ($\pm 0.25 \text{ km}^2$)				
	Febrero 20	Febrero 21	Febrero 24	Febrero 27	Febrero 28
Hierbas/Cultivo de cereales	15556	20145	19657.25	16698.75	19204.75
Arbustos	7887.5	7972.75	6762.25	8227.25	7760.75
Sabana	4507.5	5118	5186.25	5153.25	6749.5
Bosque Latifoliado	2816.5	4442.25	9038.75	6944	14435.5
Bosque Cadutifolio	769	1132.5	1442.5	1221	1987
Bosque Aciculado	151	70	134.75	387.75	242.25
Bosque Caducifolio-Aciculado	35.25	34.5	33.25	46.5	43.5
Sin vegetación	6773.75	5244.25	5121	5445.5	4988.75
Urbano	1147.75	1311.5	1233.25	785.75	1056.25
Área Total por día	39644.25	45470.75	48609.25	44909.75	56468.25

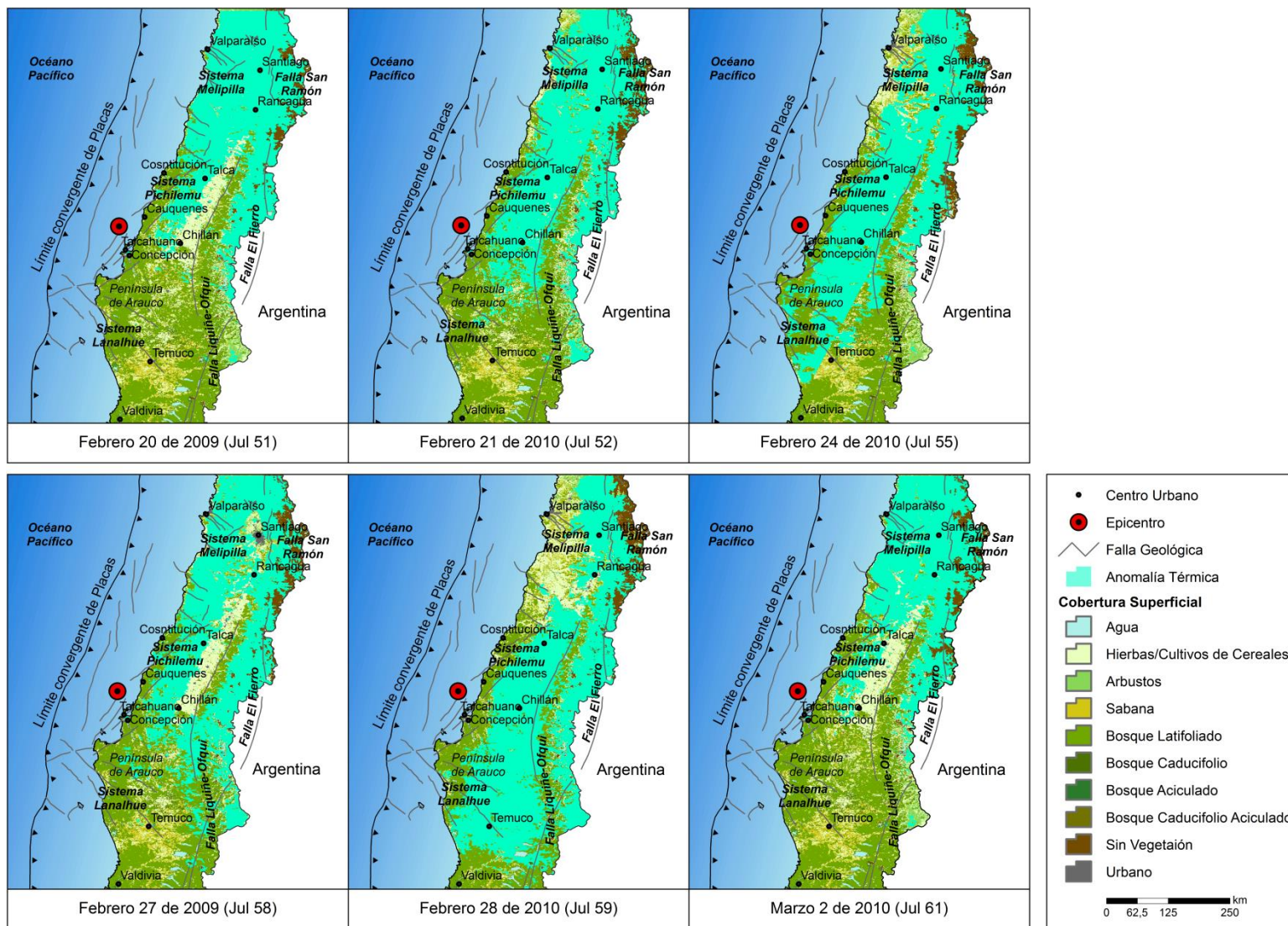


Figura 37. Distribución de la anomalía térmica (cian) sobre la componente de coberturas superficiales y sistemas de fallas geológicas en la zona de estudio.

La Figura 37 contiene la dinámica térmica respecto a la presencia de las coberturas específicas en la zona de estudio y evidencia el avance e interacción respecto a la complejidad vegetal de cada entorno. El análisis temporal térmico permite identificar la secuencia ascendente de la anomalía LST a través de las diferentes coberturas superficiales, indicando respecto al día 20 de febrero un aumento, principalmente, sobre aquellas superficies con características vegetales similares, es decir, aquellas coberturas de porte bajo y poca densidad respecto al entorno.

7.2.3. Comportamiento térmico en función de los periodos geológicos de formación litológica

En la Tabla 12 se presenta la variación espacial que cada periodo geológico ocupa sobre las clases térmicas 5 y 6 con rangos térmicos de 26-45°C de LST, lo que permite evidenciar los periodos que representan un mayor aporte a tal dinámica.

Tabla 12. Datos de variabilidad y dinámica superficial (km²) entre la anomalía térmica y la componente de periodos geológicos en la zona de estudio.

Periodo Geológico	Área en km ² por anomalía térmica (± 0.25 km ²)				
	Febrero 20	Febrero 21	Febrero 24	Febrero 27	Febrero 28
Devónico	53.75	52.5	96.5	55.75	126.25
Carbonífero	3352	4537.75	6357.75	5343.25	4655
Pérmico	0	0	66	0.5	0
Triásico	516.75	592.75	1615.25	698	2126.75
Jurásico	4006	3117	2300.5	3632.75	1114
Cretácico	5837.25	5415	4542.25	4888.75	3913.75
Paleógeno	7780	7334.25	7845	8359.5	9809
Neógeno	6679.5	6344	5579.75	8845.5	10211
Cuaternario	11361	18122.5	20409.5	12955.5	24931

Con base en los datos anteriores se establece que hasta el día 24 de febrero las rocas con edades pertenecientes al Cuaternario, Carbonífero y Triásico ocupaban la mayor variación espacial ascendente en anomalía LST.

El cubrimiento térmico espacial anómalo sobre rocas del Cuaternario aumenta más de 9000 km² entre los días 20 y 24 de febrero y se localiza en la región de la Depresión Central desde la localidad de Curicó en el Maule hasta Pitruquén en Araucanía, para el día 27 de febrero la anomalía térmica se mantiene sobre el sector comprendido entre la localidad de Chillán y la zona norte de la porción de Cordillera Principal en la región de Araucanía ocupando 1600 km² más respecto al día 20; un día después del sismo sobre las rocas de este periodo la anomalía registra 24931 ± 0.25 km² que al 2 de marzo clasifican dentro de los rangos normales de cobertura térmica.

El cubrimiento anómalo referente a rocas formadas durante el Carbonífero presenta la mayor variación respecto a su propia media, ya que al día 24 de febrero el aumento espacial equivale al 189% del área ocupada el día 20, registrando más de 3000 km² en el área total anómala, los cuales se localizan sobre la Cordillera de la Costa con dirección hacia la península de Arauco desde Talcahuano hasta Traiguén, el 27 de febrero la reducción anómala es de 1014 ± 0.25 km² respecto al día 24 y continúa descendiendo

hasta alcanzar la normalización el 2 de marzo. Para las rocas del periodo Triásico la anomalía térmica el día 24 de febrero presenta un aumento drástico de 1100 km² entre las localidades de Cañate y Carahue con temperaturas superficiales entre 27-35°C.

De esta forma se ubica geográficamente la dinámica térmica principal para los periodos geológicos de mayor influencia y variación espacial durante la serie de análisis temporal. El comportamiento térmico en la serie temporal de análisis confrontado con la ocupación espacial de los diferentes periodos de formación de las rocas muestra la influencia que la edad o el ambiente geológico genera sobre la propagación y dinámica de la anomalía LST (Figura 38).

Para explicar la influencia por periodo geológico sobre la anomalía LST cabe resaltar que las teorías de afectación térmica superficial mencionan una dependencia espacio-temporal sobre la geología local, indicando que la tasa de variación por inducción y cambios en flujos de calor y gases son agentes condicionados por el tipo de material consolidado y la época de su consolidación. Como se demostró geográficamente los periodos incluidos entre la mayor actividad anómala durante el sismo en Cauquenes se constituyen por el Cuaternario, el Carbonífero y el Triásico (Figura 38), donde la generación de grandes reservas de combustibles fósiles, carbón, gases, petróleo y otros recursos energéticos se desarrolló con el pasar del tiempo por los procesos de descomposición orgánica, cambios térmicos de reacción química y la presión inducida por la formación de nuevos sedimentos depositados por los efectos de meteorización. De esta forma se localiza un sector potencial a la manifestación anómala superficial por procesos de compresión, desgasificación y efectos de variación por flujos de calor latente por reacción tectónica.

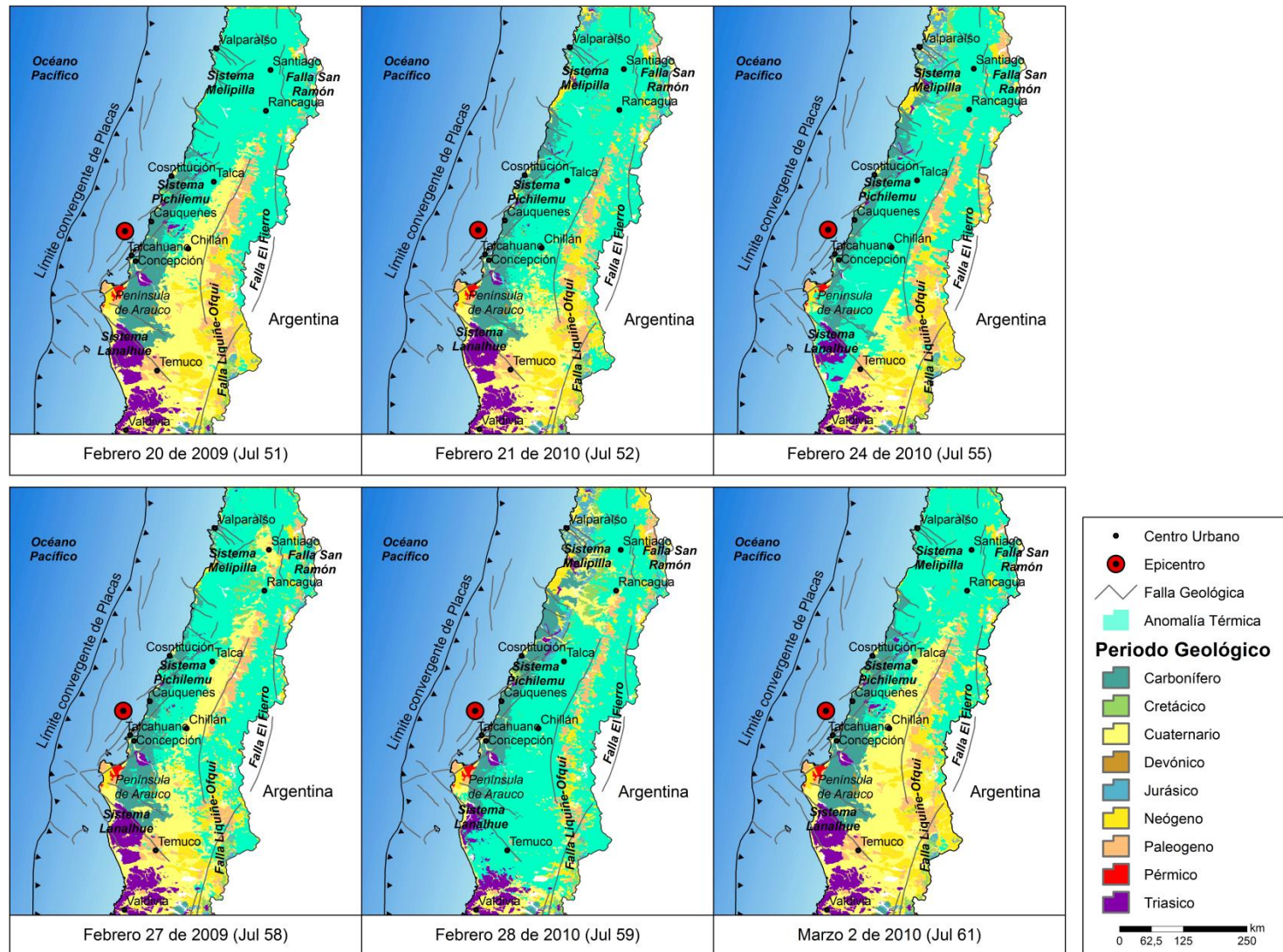


Figura 38. Distribución de la anomalía térmica (cian) sobre la componente de periodos geológicos y sistemas de fallas geológicas en la zona de estudio.

7.3. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN Y CONJUNTO DE PENDIENTES DE REGRESIÓN LINEAL EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN DE REGISTROS TÉRMICOS

Como se mencionó en la Sección 7.1., los registros LST durante las fechas próximas al sismo del 27 de febrero en 2010 presentaron variaciones espaciales y térmicas temporalmente respecto al registro obtenido de la serie de imágenes para el año 2009. En consecuencia con esto y teniendo en cuenta lo planteado por Castro (2009), la variación y el alcance espacial presentado en la Figura 31 es corroborado por los datos en las estaciones climatológicas, consideradas como el instrumento de medición directa sobre la presencia de una variación anómala de afectación espacial, mediante la correlación de los registros de la temperatura del aire para la época del suceso sísmico. Es así como el proceso de obtención de los coeficientes de correlación entre las series de datos y el cálculo de tendencias de regresión lineal para el conjunto de datos térmicos de las estaciones, permiten señalar el alcance y presencia de la dinámica térmica anómala en dicho periodo como un fenómeno percibido por diferentes instrumentos de medición.

En la Tabla 13 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos para los datos térmicos del aire y del suelo, registrados en las estaciones y el producto LST respectivamente presentados en la Tabla 8, así como el valor de las pendientes de regresión lineal de los datos en los conjuntos de análisis térmico para cada una de las estaciones climatológicas de referencia.

Tabla 13. Índices de correlación entre datos térmicos por ubicación geográfica de estaciones climatológicas

Estación Climatológica	Índice de Correlación entre Dato Satelital y Terrestre	Pendiente de Regresión Lineal	
		Promedio Histórico	Datos 2010
Valdivia	0.85363	-0.1311	0.2092
Temuco	0.82887	-0.1168	0.4372
Los Ángeles	0.84514	-0.1406	0.0977
Concepción	0.81251	-0.0442	-0.0742
Chillán	0.94255	-0.1471	0.0474
Curicó	0.81072	-0.0955	0.0379
Santo Domingo	0.96945	-0.0317	0.0408
Tabalaba	0.87502	-0.0265	-0.0451
Quinta Normal	0.95331	-0.0266	-0.0741
Pudahuel	0.98375	-0.0045	-0.1702
Rodelillo	0.77464	0.041	0.1896
La Serena	0.88838	-0.0402	0.1097

Los valores de correlación evidencian un comportamiento dependiente entre las variaciones térmicas para cada fecha de análisis, indicando un alto grado de similitud entre las diferentes tendencias térmicas y apoyando la teoría de afectación del comportamiento térmico superficial en el aire por efectos de flujo de calor latente. Con esto se demuestra que las variaciones en la temperatura del aire presentaron las mismas

tendencias que la temperatura del suelo durante la cercanía temporal a la ocurrencia del sismo del 27 de febrero y fechas posteriores a este. La tendencia promedio del comportamiento térmico en la región de estudio según los datos climatológicos es descendente, siendo las estaciones de Valdivia, Temuco, Los Ángeles, Chillán y Curicó las que presentan las tendencias más bajas; es decir, los registros con menor temperatura de todo el conjunto. Teniendo en cuenta lo anterior y con base en la información presentada en la Tabla 13, los instrumentos de medición térmica señalan que para la semana del 27 de febrero en el 2010 las variaciones térmicas generaron cambios que afectaron la condición normal del clima en la zona que integra las estaciones climatológicas de Valdivia, Temuco, Los Ángeles y Chillán ya que los valores en las pendientes de regresión lineal para el conjunto de datos en estas estaciones indican un comportamiento ascendente con mayor afectación en Temuco y Valdivia.

8. DISCUSION

Los resultados obtenidos en este estudio se asemejan a otros resultados presentados en investigaciones realizadas a nivel mundial y permiten analizar el comportamiento anómalo en LST con base en las diferentes teorías que explican su manifestación bajo la influencia sísmica. Inicialmente los marcos descriptivos sobre la conducta térmica por reacciones químicas y tectónicas marcan una secuencia de procesos dependientes entre sí desde el punto de vista geológico, donde se puede considerar que el motor de los movimientos internos y superficiales del planeta lo constituye la presencia de gases en el Manto y la Litósfera y que su variación o desequilibrio atmosférico afecta variables ambientales como la temperatura y la humedad superficial. Estas teorías mencionan que la dinámica anómala en LST está condicionada por la resistencia de las rocas a los mecanismos de fracturación y conductividad térmica (Wua *et al.*, 2000), la presencia de rutas preferenciales para la desgasificación como fallas geológicas y horizontes de material sedimentario o permeable (Etiope y Martinelli, 2002; Tronin *et al.*, 2002) y las características en el entorno geográfico y del evento sísmico; datos claves de interpretación y análisis que son mostrados con claridad en el sismo de Cauquenes del 27 de febrero de 2010 catalogado de tipo superficial y tectónico de gran magnitud, cumpliendo con las condiciones para la ideal manifestación de variaciones anómalas en LST.

El primer aspecto de análisis se centra en la respuesta y dinámica de los registros térmicos en LST diurnos del sensor MODIS capturados entre el 20 de febrero y el 2 de marzo de 2010 respecto a la geología regional y reclasificados en función de la tendencia histórica del archivo de datos generados por estaciones climatológicas en la región, donde los rangos térmicos que contienen las variaciones anómalas presentaron dos picos máximos dentro del intervalo temporal. Un primer pico tres días antes del sismo con un cubrimiento espacial de $79618 \pm 0.25 \text{ km}^2$ y diferenciaciones térmicas alrededor de los 12°C respecto al registro habitual regional, resultados similares a los obtenidos por Choudhury *et al.* (2006) durante el sismo de 2003 en Zarand; y un segundo pico un día después del evento con un aumento superior a los 8000 km^2 en LST de 26°C en adelante, corroborando lo planteado por Qiang *et al.* (1997) cuando afirman que las variaciones térmicas máximas en la superficie no presentan una correspondencia temporal con la fecha de ocurrencia del evento sísmico.

Es aquí donde adquiere importancia la relación teórica entre lo planteado por Freund (2002) y Pulinets *et al.*, (2006) y (2007), ya que si se considera la generación de anomalías en LST por reacción química mediante cambios en la tasa de flujo de gases hacia la superficie y la influencia directa por conductividad de calor litológico, se puede decir que el 21 de febrero en la región de estudio se manifiesta el primer indicio de desgasificación por activación y origen de microfracturas, pues las principales unidades geológicas afectadas se constituyen por rocas ígneas como riolitas, granito, granodiorita, dioritas, tonalitas, basalto, pómez y material sedimentario como gravas, arenas y limos, que datan de los periodos Carbonífero y Cuaternario donde el contenido de material orgánico representa un alto porcentaje sobre la generación de combustibles naturales como el dióxido de carbono, el metano, etc.; esto hace referencia a que antes del 21 de febrero los mecanismos de compresión habrían alcanzado niveles críticos en la región continental provocando que las rocas ígneas, por medio de la microfracturación, cedieran ciertas cantidades de gas a estructuras de escape definidas (Tronin *et al.*, 2002), en este caso la Falla Liquiñe-Ofqui, para conformar grandes volúmenes y combinación con otros

gases presentes en el material sedimentario y dispersados entre considerables extensiones superficiales mediante las propiedades de porosidad y permeabilidad que ofrece el material granulado y al final generar para éste día el aumento térmico por procesos de ionización. Se puede decir que el mismo proceso se desarrolla hasta, o poco antes de, el 24 de febrero que es cuando se alcanza el máximo registro espacial y térmico de anomalías en LST y se incluye material rocoso como esquistos, coquinas, areniscas y diamictos.

Para explicar el descenso espacial en el registro anómalo LST entre el 24 y 27 de febrero, día del sismo, se retoma el marco descriptivo presentado por Freund (2002) y Qiang *et al.* (1997), donde se expone que la intensidad de esfuerzos compresivos genera la eliminación de espacios y cavidades y el cierre de microfisuras y por ende el corte del flujo de gases hacia la superficie, debido a que el material rocoso acerca su resistencia al límite de fluencia, provocando que en la región donde estos gases reaccionan se experimente una caída drástica de los registros térmicos; comportamiento observado el 27 de febrero cuando el cubrimiento espacial anómalo por rangos en la clasificación térmica presentó valores cercanos a los valores normales en la tendencia histórica de la región y que coincide con la fecha de máxima resistencia de fracturación o desplazamiento relativo de las rocas en el hipocentro. Estos resultados son semejantes en cuanto a la manifestación de ocurrencia temporal de los casos estudiados por Choudhury *et al.*, 2006, Saraf *et al.*, 2009, Zhang *et al.*, 2010, Tronin *et al.*, 2004 y Dimitar *et al.*, 2006, entre otros, donde el inicio de las variaciones anómalas se registraron entre una y dos semanas antes del sismo alcanzando un máximo térmico y espacial entre dos a siete días de anterioridad y una rápida disminución térmica hasta que ocurre el evento, presentando posteriormente, hasta dos semanas después, una normalización térmica regional. Para el sismo de Cauquenes tal normalización se registra el 2 de marzo de 2010, cuatro días después del sismo.

Teniendo en cuenta lo anterior se facilita la comprensión de la conducta anómala registrada el 28 de febrero que espacial y térmicamente supera los registros obtenidos el día 24, fecha correspondiente al primer pico anómalo térmico que señala la máxima variación pre-sísmica en la curva térmica teórica. De esta forma se tiene que entre el 20 y 27 de febrero los diferentes esfuerzos de compresión en la corteza liberaron cantidades progresivas en volumen de gas que luego reaccionaron químicamente por proceso de ionización; esfuerzos que no generaron movimientos telúricos mayores hasta el día 27 cuando se genera el evento sísmico, si se considera que el 27 de febrero los mecanismos de reajuste liberan la mayor cantidad de gases y calor desde el interior de la corteza se explica por qué sólo un día después del evento se registra la mayor variación térmica y espacial, ya que probablemente tales movimientos afectaron directamente la velocidad y tasa volumétrica de desgasificación y por ende la rápida respuesta térmica superficial por reacción química y aumento de flujos de calor por conductividad litológica que ocupó 12160 km².

Dado que Choudhury *et al.* (2006), Dimitar *et al.* (2006) y Filizzola *et al.* (2004), puntualizan el análisis en emisividad mediante la relación entre sismicidad y coberturas como variables correlacionables ante el factor térmico superficial donde las zonas con vegetación baja y una larga línea base de observación espacial permiten y facilitan el procesamiento de datos enfocados a una tendencia anómala; el segundo aspecto de análisis se desarrolla basado en los resultados de dinámica superficial obtenidos entre las imágenes de la serie térmica y su respuesta frente a las coberturas del suelo presentes en la región de mayor variación para los registros de temperatura. De esta forma se

establece que la variación espacial alcanzada durante la serie temporal de análisis para los rangos de mayor contenido térmico, temperaturas de clase de 26-60°C, concentra los máximos registros sobre los suelos con coberturas vegetales bajas como hierbas, cultivos de porte bajo y arbustos, enfatizando que por las características de humedad en el Bosque Latifoliado la respuesta espectral en esos sectores presenta aumentos térmicos significativos en menor tiempo (Deans *et al.*, 2006). Teniendo en cuenta la dinámica espacial de la anomalía térmica por acción de ionización superficial en el suelo, no se tiene una respuesta clara sobre si hay una influencia directa en la dirección de propagación de dicha anomalía a causa del dominio de coberturas en la región ya que en general la zona de estudio presentaba cerca de 80000 km² entre las dos coberturas de interés haciendo que las demás coberturas tuvieran menor participación en el entorno anómalo LST. Sin embargo, aunque dichas coberturas (Hierbas/Cultivo de cereales y Bosque Latifoliado) presentan similar distribución para el año 2010 en la zona de mayor aumento térmico, la cobertura de Hierbas/Cultivo de cereales es la que registra el mayor cubrimiento anómalo superficial y térmico, dando peso a lo planteado teóricamente y destacando que la mayor respuesta espectral se condiciona por suelos con vegetación de porte bajo y áreas con altos porcentajes de humedad.

El último aspecto de discusión y análisis se desarrolla teniendo en cuenta los estudios realizados por Pulinets *et al.* (2006) y Choudhury *et al.* (2006) donde se utilizan instrumentos meteorológicos de medición directa sobre el comportamiento térmico superficial durante la ocurrencia de eventos sísmicos como registros de soporte y validación de resultados en procesamiento de datos espectrales y generadores de información hacia la descripción del comportamiento anómalo en LST. Estos estudios presentan coeficientes de correlación cercanos a 1 entre las curvas de variación térmica obtenidas del procesamiento en imágenes satelitales y los archivos de captura en estaciones climatológicas con correspondencia geográfica, indicando un alto grado de dependencia por variaciones y afectaciones entre éstas. Para el sismo en Cauquenes el proceso de correlación tiene en cuenta registros de temperatura máxima del aire recopilados de 12 estaciones climatológicas distribuidas a lo largo y ancho de la zona de estudio, los cuales presentaron coeficientes entre 0.77 y 0.97 como datos de comparación a los registros obtenidos de las imágenes en la serie térmica.

Un punto clave en la confiabilidad del comportamiento LST generado desde MODIS lo constituye el punto de inflexión marcado entre los días 24 y 25 de febrero con datos oscilantes de 33 y 18°C respectivamente en los registros terrestres para las estaciones ubicadas en la zona de afectación, indicando el máximo registro térmico y la tendencia de descenso de temperaturas en la región; además se corrobora la tendencia anómala mediante los valores positivos en las pendientes de regresión lineal en todas las estaciones contenidas dentro del área que registró un comportamiento anómalo térmico, señalando con precisión que las estaciones en Chillán, Los Ángeles, Curicó, Temuco y Pudahuel marcaban una variación importante en el comportamiento de la temperatura del aire para las fechas próximas al evento sísmico.

9. CONCLUSIONES

Los diferentes marcos descriptivos o teorías sobre reacción térmica por efectos sísmicos son secuenciales y dependientes entre sí, ya que el proceso de desgasificación natural y necesario que se genera al interior de la corteza terrestre, por efectos y reacciones químicas, activa los diferentes mecanismos de relajación cortical haciendo que la presencia o expansión de un gas modifique el estado litológico donde por efectos de compresión se da la liberación y acumulación de otros gases, vapores y calor en constante reacción por cambios de presión e interacción entre sustancias, hasta convertirse en una dinámica aleatoria que termina con la manifestación telúrica o liberación total o parcial de energía acumulada y una variación térmica superficial importante.

La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor remoto genera una serie de datos interpretables de la Tierra, que al ser procesados y rectificados en sus diferentes distorsiones y afectaciones atmosféricas, generan información en un área y tema específicos de interés. Por esta razón, la condición óptima en la detección de anomalías en LST incluye el tiempo seco, las escenas libres de nubes y suelos con predominancia de vegetación baja, ya que éstas condiciones minimizan la pérdida de emisividad del suelo por influencia del entorno superficial.

El análisis desarrollado sobre registros en el TIR, obtenidos por satélites durante la época de preparación de los terremotos de referencia, demostró que variaciones en anomalías térmicas transitorias entre 5-16°C en LST se producen antes de que ocurran estos eventos, donde el proceso de manifestación involucra fallas geológicas principales y zonas cercanas al epicentro como se demostró en Bhuj (India), Kunlun, (China), Boumerdes, (Norte de Argelia), Colima (México) y Cauquenes (Chile), con variaciones espaciales superiores a los 17000 km² en un radio de aproximadamente 100 km alrededor del sector de iniciación que sobrepasan en varias unidades los registros térmicos históricos.

Se requiere la profundización de análisis geotérmico por incidencia sísmica en otras zonas afectadas por terremotos de magnitud superior a 5 Mw para establecer si la manifestación y dinámica del fenómeno térmico está condicionada por la profundidad y magnitud del evento sísmico, el tipo de rocas que componen el suelo local superficial y la Litósfera interna, el tipo de coberturas y los niveles de humedad de la zona; así como la localización geográfica y las condiciones de variabilidad climática.

El sismo en Cauquenes afectó, durante su preparación de manifestación, térmicamente la superficie terrestre en las regiones del Maule y Biobío, presentando una curva de variación térmica que se ajusta teóricamente al registro de picos máximos y una posterior disminución de la temperatura antes de la ocurrencia del sismo, para luego presentar normalización de la tendencia térmica regional. De esta forma se pone en evidencia una posible variable precursora sobre los adelantos y técnicas de seguimiento en la modelación y dinámica sísmica.

La caracterización detallada de cada una de las variables físico-ambientales permitió describir y analizar cómo y por qué la anomalía térmica desarrolló la dinámica de expansión y contracción superficial, apoyando la reacción térmica propuesta en los marcos teóricos y definiendo que por los procesos de desgasificación, conductividad

calórica e ionización por acoplamiento lito-atmosférico la manifestación sísmica presenta variaciones LST asociables al fenómeno.

El análisis de variación térmica respecto a la edad de las rocas, en las diferentes unidades geológicas, permitió establecer la influencia de los ambientes naturales en los periodos geológicos durante la formación litológica, evidenciando que aquellos periodos ricos en variedades de fauna y flora aportan los mayores cambios superficiales en anomalías térmicas por presencia de material orgánico en reacción química.

Los resultados obtenidos en este trabajo arrojan información coherente con los publicados por investigadores, abriendo paso a futuros complementos investigativos que direccionen la técnica de tratamiento y análisis espacial y que permitan establecer cuáles son los rangos anómalos característicos en función de las componentes geológicas, superficiales y climáticas para diferentes magnitudes sísmicas, generando intervalos temporales de antelación por efectos durante la preparación y manifestación telúrica, proponiendo acciones de monitoreo y reacción sobre las zonas de mayor actividad sísmica en el planeta.

BIBLIOGRAFIA

Arancibia G., Cembrano J., Lavenu A., "Transpresión dextral y partición de la deformación en la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, Aisén, Chile (44-45°S)", *Revista Geológica de Chile*, vol.26 Issue1, pp. 03-22, 1999.

Axel C., Escobar J., "Así se gestó el megaterremoto, el más intenso en Chile desde 1960". La Tercera. Consultado el 28 de febrero de 2010.

Barrientos S., "Informe técnico actualizado 27 Mayo 2010: Terremoto Cauquenes 27 Febrero 2010". Servicio Sismológico Universidad de Chile. 2010.

Belmar M., Morota D., "Nature and P-T-t constraints of very low-grade metamorphism in the Triassic-Jurassic basins, Coastal Range, central Chile", *Revista Geológica de Chile*, vol. 32 Issue 2, pp189-205, 2005.

Brasa A., "Determinación mediante teledetección de la evapotranspiración en regadíos extensivos", *Universidad de Castilla*, pp 43-52, 1997.

Castillo E., Pereda R., Ruiz J., Sánchez M., "La corrección atmosférica en la Teledetección Aerotransportada", Congreso de la Asociación Española de Teledetección, pp 409-412, 2009.

Castillo J.C., Moreno G.A., "Semillas forestales del bosque chileno", Bosque Nativo, pp. 153, 2000.
<http://books.google.com.co/books?id=OiDWld9t8xUC&pg=PA153&dq=clima+en+region+del+maule&hl=es-419&sa=X&ei=yCVgU5ffCJDMsQT-hYL4CQ&ved=0CDMQ6AEwAQ#v=onepage&q=clima%20en%20region%20del%20maule&f=false>

Castro I., "Metodología de validación de productos MODIS para la estimación de temperatura de la superficie en zonas heterogéneas y homogéneas de Colombia", Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, 2009.

Cembrano J., Schermer E., Lavenu A., Sanhueza A., "Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquiñe-Ofqui fault zone, southern Chilean Andes", *Tectonophysics*, vol. 319, pp 129-149, 2000.

Chiodini G., Caliro S., Cardellini C., Avino R., Granieri D., Schmidt A., "Carbon isotopic composition of soil CO₂ efflux, a powerful method to discriminate different sources feeding soil CO₂ degassing in volcanic-hydrothermal areas", *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 274 Issues 3-4, pp 372-379, 2008.

Chockalingam S., Earl D., "Mechanical properties of 2.45 GHz microwave sintered Si₃N₄-Y₂O₃-MgO-ZrO₂ system", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 29, pp 2037-2043, 2009.

Choudhury S., Dasgupta S., Saraf A., Panda S., "Remote sensing observations of pre-earthquake thermal anomalies in Iran", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, pp 4381-4396, 2006.

Cruz S.C., Calderón S.J., “Guía Climática Práctica - Chile”, Dirección Meteorológica de Chile, Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada, DGAC, 2008.

Das Arulsamy A., “*Renormalization group method based on the ionization energy theory*”, Annals of Physics, vol. 326, pp 541-565, 2011.

Deans J., Gerhard J., Carter L.J., “*Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface*”, Infrared Physics & Technology, vol. 48, pp 202-216, 2006.

Delanoy R.A., “*Aspecto de Sismología Dominicana. República Dominicana*”: Santo Domingo., 2010.

Dimitar O., Nevin B., Thomas L., Sergey P., Patrick T., “*Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999–2003*”, Physics and Chemistry of the Earth, vol. 31, pp 154-163, 2006.

Dirección General de Aeronáutica Civil, Dirección Meteorología de Chile. Online: [<http://164.77.222.61/climatologia>]

Dixon H.J., Murphy M.D., Sparks S., Chávez R., Naranjo J.A., Dunkley P.N., Young S.R., Gilbert J.S., Pringle M., “*The Geology of Nevados de Chillán volcano, Chile*”, Revista Geológica de Chile, vol.26 Issue 2, pp. 227-253, 1999.

Enders A, Brandt Z., “*Mapping disability-relevant resources*”. Map., Journal of Disability Policy Studies [serial online]. Spring 2007; 17(4): 227. Available from: Academic Search Premier, Ipswich, MA. Accessed December 14, 2007.

Ene D., Craifaleanu I., “*Seismicity and design codes in chile: Characteristic features and a comparison with some of the provisions of the romanian seismic code*”, Constructii, vol. 10 Issue 2, pp 69-78, 2010.

Espinosa A., “*Historia Sísmica de Colombia, 1550 – 2000*”, Enciclopedia de Desastres Naturales Históricos de Colombia / Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad del Quindío, vol. 3, pp 153-165, 2008.

Etiope G., Martinelli G., “*Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview*”, Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 129, pp 185-204, 2002.

Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V., “*Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake*”, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, vol 29, pp 517-527, 2004.

Freund F., “*Charge generation and propagation in igneous rocks*”, Journal of Geodynamics, vol 33, pp 543-570, 2002.

Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X., “*MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets*”, Remote Sensing of Environment, vol. 114, pp. 168-182, 2010.

Gallego O.F., Martins-Neto R.G., Nielsen S.N., “*Conchostracans and insects from the Upper Triassic of the Biobío river (‘Santa Juana Formation’), south-central Chile*”, *Revista Geológica de Chile*, vol.32 Issue 2, pp.293-311, 2005.

Kaufman Y., Tanrd D., “*Strategy for Direct and Indirect Methods Correcting the Aerosol Effect on Remote Sensing: From AVHRR to EOS-MODIS*”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 55, pp 65-79, 1996.

LAADS/ NASA. Online: [<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data>]

Landsat Project Science Office, 2002. *Landsat 7 Science Data User's Handbook*. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.

Matus P., Novoa E., “*Enciclopedia regional del Bío-Bío*”, Biblioteca del Bicentenario: Pehuén Editores, vol. 8, pp. 21-23, 2006.

http://books.google.com.co/books?id=x_3Kd60w6doC&pg=PA21&dq=clima+en+region+de+l+biobio&hl=es419&sa=X&ei=yiJgU9r5FivLsATloIKYDg&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=clima%20en%20region%20del%20biobio&f=false

Moreno M., “*Dinámica del Antearco Externo en la zona del Bloque de Arauco, 37°-38°S, Octava Región, Chile*”, Universidad de Concepción, Facultad de ciencias Químicas, Departamento Ciencias de la Tierra. Concepción, 2004.

Moreno M., Rosenau M., Oncken O., “*2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone*”, *Nature*, vol. 467, pp 198-204, 2010.

Mörner N., Etiope G., “*Carbon degassing from the lithosphere*”, *Global and Planetary Change*, vol 33, pp 185-203, 2002.

Muto J., “*Rheological structure of northeastern Japan lithosphere based on geophysical observations and rock mechanics*”, *Tectonophysics*, vol. 503, pp 201-206, 2011.

Neumann N., Sandiford M., Foden J., “*Regional geochemistry and continental heat flow: implications for the origin of the South Australian heat flow anomaly*”, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 183, pp 107-120, 2000.

Ouzounov D., Freund F., “*Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data*”, *Advances in Space Research*, vol. 33, pp 268-276, 2004.

Piquer J.C., “*Ambiente geológico del prospecto Infiernillo, Cordillera de Curicó, VII Región*”, Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago. pp. 100, 2005.

Piquer J., Castelli J.C, Charrier R., Yáñez G., “*El Cenozoico del alto río Teno, Cordillera Principal, Chile central: estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas*”, *AndeanGeology*, vol. 37 Issue 1, pp. 32-53, 2010.

Pulinets S., Ouzounov D., Karelin A., Boyarchuk K., Pokhmelnikh L., “*The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes*”, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 31, pp 143-153, 2006.

Pulinets S., Dunajacka M., “Specific variations of air temperature and relative humidity around the time of Michoacan earthquake M8.1 Sept. 19, 1985 as a possible indicator of interaction between tectonic plates”, *Tectonophysics*, vol. 431, pp 221-130, 2007.

Qiang Z., Xu X., Dian C., “Case 27 Thermal Infrared anomaly precursor of impending earthquakes”, *Pure and Applied Geophysics*, vol 149, Issue 1, pp 159-171, 1997.

Raissouni N., Sobrino J., “Teledetección”, Universidad de Valencia, 2000

Rauld R.A., “Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la Quebrada Macul. Memoria”, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, pp. 57, 2002.

Saraf A., Rawat V., Choudhury S., Dasgupta S., Das J., “Advances in understanding of the mechanism for generation of earthquake thermal precursors detected by satellites”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 11, pp 373-379, 2009.

Sugaki A., Campos E., Kojima S., “Mineralogy of the Panulcillos karncopper deposit, Coquimbo Region, Chile”, *Revista Geológica de Chile*, vol. 27 Issue2, pp.139-155, 2000.

Tank V., Pfaz H., Kick H., “New remote sensing techniques for the detection and quantification of earth surface CO₂ degassing”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 177 Issue 2, pp 515-524, 2008.

Tronin A., Biagi F., Molchanov O., Khatkevich Y., Gordeev E., “Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area”, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol 29, pp 501-506, 2004.

Tronin A., Hayakawa M., Molchanov O., “Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China”, *Journal of Geodynamics*, vol 33, pp 519-534, 2002.

TuTiempo.net. Online: [<http://www.tutiempo.net/clima/Chile/CL.html>]

Vargas S., “Las Verdades de la Falla San Ramón”, *Beauchef Magazine*, pp. 25-27, 2010.

van Niel T., McVicar T., Roderick M., van Dijk A., Beringer J., Hutley L., van Gorseli E., “Upscaling latent heat flux for thermal remote sensing studies: Comparison of alternative approaches and correction of bias”, *Journal of Hydrology*, vol. 468–469, pp 35-46, 2012.

Wahlström M., “ONU: Desastres naturales en 2011 dejaron pérdidas económicas récord”, *RPP Noticias*, 2012.
http://www.rpp.com.pe/2012-03-05-onu-desastres-naturales-en-2011-dejaron-perdidas-economicas-record-noticia_458068.html

Weng Q., *“Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies:Methods, applications, and trends”*, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol 64, pp 335-344, 2009.

Wenyuan W., Lejun Z., Xiaohua S., Shanlong L., Nan S., Fanli K., Youpu D., *“Thermal infrared remote-sensing detection of thermal information associated with faults: A case study in Western Sichuan Basin, China”*, Journal of Asian Earth Sciences, vol 43, pp 110-117, 2012.

Wu L., Cuib C., Gengc N., Wanga J., *“Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies”*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol 37, pp 879-888, 2000.

Yáñez G.A., Gana P., Fernández R., *“Origen y significado geológico de la Anomalía Melipilla, Chile central”*, Revista Geológica de Chile, vol.25 Issue 2, pp.175-198. 1998.

Zhang Y., Guo X., Zhong M., Shen W., Li W, He B., *“Wenchuan earthquake: Brightness temperature changes from satellite infrared information”*, Chinese Science Bulletin, vol. 55 Issue 18, pp 1917-1924, 2010.

ANEXOS

ANEXO 1: Archivo histórico de temperatura máxima diaria registrada durante los meses de Febrero y Marzo desde el año 2000 hasta el año 2011 para las estaciones climatológicas de Concepción, Chillán, Los Ángeles, Curicó, Temuco, Santo Domingo, Valdivia, Rodelillo, Pudahuel Santiago, Quinta Normal, Eulogio Sánchez y La Serena.

ESTACIÓN	AÑO	MES	REGISTRO TÉRMICO MÁXIMO DIARIO (°C)																															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Concepción	2000	Febrero	23.5	23.0	23.5	23.3	22.5	23.0	22.9	23.0	21.0	21.2	21.0	21.2	22.0	23.0	23.8	22.0	22.0	24.0	24.4	21.0	24.0	24.4	22.7	23.0	23.3	23.2	18.0	22.0	22.1			
Concepción	2001	Febrero	21.0	21.9	25.0	26.0	25.8	24.2	23.3	21.5	21.8	22.0	23.0	24.0	24.2	24.0	25.0	25.8	26.0	26.5	25.4	20.0	24.0	24.3	22.6	19.8	23.0	23.4	22.0	23.1				
Concepción	2002	Febrero	24.0	24.6	23.3	23.7	23.4	20.0	20.3	19.9	21.0	21.6	22.0	22.5	22.3	22.0	21.0	21.6	19.3	21.2	30.0	18.0	18.2	22.4	24.2	24.0	24.6	17.6	18.0	19.2				
Concepción	2003	Febrero	23.0	24.0	24.9	25.0	24.0	24.2	23.5	23.0	24.5	25.0	25.5	25.0	24.8	23.2	22.0	23.0	23.0	23.9	21.1	22.0	27.0	27.4	21.0	22.4	21.5	22.0	23.0	22.6				
Concepción	2004	Febrero	24.9	23.7	22.5	26.0	27.2	27.9	20.1	22.0	24.1	24.3	22.9	22.8	22.9	23.0	23.6	20.1	22.0	25.0	26.2	27.0	20.3	21.8	22.5	20.0	20.1	21.1	21.7	22.5	23.0			
Concepción	2005	Febrero	29.0	29.0	19.0	20.0	19.2	20.0	22.0	25.0	25.4	22.2	18.8	21.1	24.0	24.6	25.0	25.7	26.2	23.0	22.8	23.0	23.6	23.9	24.2	26.0	28.2	30.0	25.1	21.5				
Concepción	2006	Febrero	19.0	19.0	19.3	22.0	24.0	24.0	23.0	23.1	24.0	24.0	25.0	25.0	20.0	20.8	20.4	23.0	23.2	22.0	24.0	23.0	24.0	21.1	25.0	26.1	26.7	23.8	21.0	21.3				
Concepción	2007	Febrero	24.1	24.7	25.8	22.1	23.4	22.0	22.2	22.4	23.4	26.0	26.9	21.3	21.8	21.5	21.6	18.0	20.3	21.0	22.0	22.5	21.9	21.0	22.0	24.0	24.2	22.7	21.6	22.6				
Concepción	2008	Febrero	27.0	26.6	26.6	22.0	23.2	23.9	26.0	27.3	24.0	29.3	22.0	22.7	22.7	23.0	23.5	23.1	24.0	24.2	24.3	25.0	25.4	21.0	21.0	20.6	21.1	20.3	20.0	24.0	24.6			
Concepción	2009	Febrero	22.3	22.0	23.0	22.8	22.3	23.0	23.8	24.3	24.8	22.2	26.0	25.7	25.0	25.6	25.7	21.3	24.6	25.1	19.7	22.0	22.9	24.0	25.0	25.6	21.0	25.0	25.1	20.0				
Concepción	2010	Febrero	22.5	20.5	19.1	19.8	21.7	16.5	22.1	21.8	22.4	23.6	23.6	21.6	25.2	24.3	22.4	20.0	16.2	21.3	21.3	21.5	20.4	21.0	22.0	22.6	20.5	21.5	21.5	15.8				
Concepción	2011	Febrero	22.7	21.4	22.5	22.2	24.6	25.3	19.4	17.7	17.0	18.0	21.0	20.7	23.5	25.0	25.7	20.0	23.0	25.0	25.5	20.0	21.0	22.0	22.2	22.1	23.1	19.8	22.0	22.4				
Concepción	2000	Marzo	24.5	23.8	25.4	26.1	26.0	28.4	28.5	28.0	19.6	25.2	24.4	19.0	20.0	25.0	21.0	22.0	23.4	26.2	21.8	19.8	24.4	24.0	19.4	25.4	24.4	19.2	17.4	25.2	25.4	21.6	24.6	
Concepción	2001	Marzo	28.0	27.5	29.7	27.3	23.6	26.4	26.8	26.6	23.6	15.5	21.8	24.0	24.8	28.6	28.8	30.0	28.0	22.7	22.8	21.2	21.0	20.8	24.7	28.8	27.8	26.6	22.4	24.0	25.4	23.4	22.0	
Concepción	2002	Marzo	25.0	25.6	24.4	24.1	26.2	27.0	24.4	24.6	23.0	22.4	25.4	27.7	20.8	15.4	17.2	19.6	15.2	14.3	23.5	27.0	25.0	22.5	22.8	20.9	20.3	22.6	23.4	19.0	20.4	22.6	26.4	
Concepción	2003	Marzo	27.2	29.0	33.1	28.2	28.6	36.5	28.4	26.2	26.8	28.0	29.0	25.8	25.9	23.8	26.6	31.0	29.9	28.0	22.4	27.3	33.3	24.0	21.6	25.8	28.1	21.0	23.2	23.1	23.5	25.8	24.4	
Concepción	2004	Marzo	16.2	23.0	29.6	29.2	21.2	24.0	25.2	28.0	27.4	30.4	19.2	24.6	19.2	24.0	28.2	28.0	23.5	28.4	27.8	29.4	30.0	29.6	29.0	26.4	26.4	27.7	31.0	19.2	23.2	24.8	18.4	
Concepción	2005	Marzo	25.3	30.2	33.4	26.2	27.4	21.8	17.0	22.0	27.4	30.0	25.2	24.9	30.0	26.6	20.6	24.4	24.2	24.8	20.8	25.0	25.0	28.8	30.3	27.0	25.4	23.6	24.3	20.4	23.6	22.8	22.2	
Concepción	2006	Marzo	26.0	27.3	29.8	31.0	25.5	22.2	24.6	23.3	27.4	25.6	26.2	27.0	22.8	25.2	21.6	20.8	22.1	27.0	27.4	28.0	25.0	27.8	23.6	19.2	26.8	25.7	23.6	28.8	26.2	15.4	22.2	
Concepción	2007	Marzo	22.2	25.2	28.0	29.0	29.6	29.2	25.2	21.2	25.2	27.0	27.6	28.6	27.0	25.4	24.2	27.0	31.2	32.4	30.2	29.0	22.4	24.0	25.0	26.6	23.6	20.6	18.0	20.4	17.8	26.2	26.6	
Concepción	2008	Marzo	24.0	30.0	30.0	28.8	26.8	28.6	27.0	25.2	28.2	30.6	23.6	30.0	32.0	30.4	27.0	26.8	28.4	28.8	25.4	28.6	29.6	31.0	25.8	24.4	22.4	25.6	24.2	26.4	24.0	26.6	26.6	
Concepción	2009	Marzo	21.4	27.0	28.4	28.2	30.0	31.6	31.2	34.6	37.8	30.0	31.2	31.2	30.4	27.0	31.6	24.8	29.8	30.4	29.8	28.6	28.2	26.8	29.4	29.6	28.8	27.4	27.8	23.4	21.4	23.2	25.8	
Concepción	2010	Marzo	25.4	23.4	26.6	26.6	28.4	32.0	26.8	22.6	30.6	30.0	27.6	22.4	26.4	24.6	27.6	25.0	23.4	25.0	27.8	25.2	22.0	21.6	24.4	28.8	29.8	27.0	29.0	25.6	28.0	31.6	22.6	
Concepción	2011	Marzo	32.4	29.0	30.4	33.0	28.6	24.4	29.6	32.0	29.0	27.0	19.0	19.0	19.0	22.0	19.0	23.2	20.8	26.0	28.0	26.4	24.2	22.0	22.2	24.8	20.6	19.0	21.0	25.0	24.4	25.0	23.2	

Chillán	2000	Febrero	25.0	27.6	30.0	26.2	19.9	25.6	29.0	17.4	24.4	23.4	19.2	22.1	25.4	30.0	24.4	26.6	24.8	28.2	32.6	32.6	33.0	28.0	29.0	28.0	25.0	18.4	16.6	22.0	23.7			
Chillán	2001	Febrero	26.8	23.8	29.6	31.6	31.0	29.4	28.4	32.0	23.2	24.0	26.0	30.0	30.0	29.2	31.2	33.5	34.7	32.8	30.8	29.4	28.6	28.6	26.4	26.6	29.5	28.0	28.2	26.6				
Chillán	2002	Febrero	34.6	35.6	31.4	32.3	32.0	29.0	30.6	27.1	28.2	26.6	29.4	31.4	31.3	29.0	30.4	31.5	28.0	29.8	38.0	37.8	28.0	31.0	32.0	33.2	30.0	13.4	14.5	21.1				
Chillán	2003	Febrero	29.0	28.6	28.8	29.8	28.2	25.0	27.6	28.6	30.4	31.5	29.2	31.0	32.6	23.8	24.8	29.4	26.7	21.4	20.2	27.1	32.2	31.8	33.2	32.0	20.0	27.2	26.0	26.2				
Chillán	2004	Febrero	31.7	27.8	29.1	34.4	36.9	30.0	28.2	27.0	30.0	31.4	30.2	30.4	31.0	30.2	30.2	22.8	25.0	28.2	35.0	30.2	29.2	31.0	32.4	27.4	28.0	28.0	25.4	27.0	27.6			
Chillán	2005	Febrero	34.1	34.2	29.5	31.0	30.2	26.5	30.1	31.2	37.8	33.5	26.3	23.6	26.8	29.1	30.6	33.0	31.8	32.0	31.1	32.9	33.0	32.4	31.3	33.0	33.9	32.6	28.5	21.4				
Chillán	2006	Febrero	31.6	29.9	28.8	29.4	31.0	31.9	27.6	29.6	33.9	33.2	33.2	34.0	31.1	32.0	28.5	28.6	29.4	29.7	32.4	32.0	28.0	24.4	29.0	32.1	30.6	19.6	23.4	25.4				
Chillán	2007	Febrero	33.6	34.4	30.0	32.8	30.2	25.4	26.4	29.6	32.0	34.0	27.2	29.0	27.0	25.6	19.0	19.2	22.0	25.0	22.4	24.6	22.3	24.4	26.8	29.0	27.0	27.0	26.6	21.6				
Chillán	2008	Febrero	32.6	35.8	34.0	26.4	31.4	25.4	33.6	30.0	26.6	34.2	36.8	32.4	29.4	28.6	31.0	29.2	30.2	32.6	33.2	32.2	30.0	31.2	29.2	31.6	32.4	32.0	29.8	32.2	29.8			
Chillán	2009	Febrero	30.2	26.6	28.0	29.6	24.6	26.6	27.2	30.8	29.6	28.4	31.2	30.2	29.8	33.8	29.4	26.6	32.4	28.6	26.4	24.6	25.4	28.8	31.6	33.4	32.0	31.0	33.0	30.2				
Chillán	2010	Febrero	29.8	27.0	20.2	24.8	26.6	22.2	21.6	26.8	27.0	27.0	29.4	29.6	28.2	26.6	26.6	28.4	24.4	25.0	24.6	26.0	27.6	22.0	25.4	30.0	18.4	23.2	31.0	31.0				
Chillán	2011	Febrero	29.6	27.0	25.0	29.2	31.2	29.6	31.4	32.0	30.6	28.2	25.0	19.2	26.4	33.6	30.8	21.6	27.8	34.6	30.4	28.0	28.0	26.6	24.0	29.0	31.0	32.2	33.0	32.4				
Chillán	2000	Marzo	24.5	23.8	25.4	26.1	26.0	28.4	28.5	28.0	19.6	25.2	24.4	19.0	20.0	25.0	21.0	22.0	23.4	26.2	21.8	19.8	24.4	24.0	19.4	25.4	24.4	19.2	17.4	25.2	25.4	21.6	24.6	
Chillán	2001	Marzo	28.0	27.5	29.7	27.3	23.6	26.4	26.8	26.6	23.6	15.5	21.8	24.0	24.8	28.6	28.8	30.0	28.0	22.7	22.8	21.2	21.0	20.8	24.7	28.8	27.8	26.6	22.4	24.0	25.4	23.4	22.0	
Chillán	2002	Marzo	25.0	25.6	24.4	24.1	26.2	27.0	24.4	24.6	23.0	22.4	25.4	27.7	20.8	15.4	17.2	19.6	15.2	14.3	23.5	27.0	25.0	22.5	22.8	20.9	20.3	22.6	23.4	19.0	20.4	22.6	26.4	
Chillán	2003	Marzo	27.2	29.0	33.1	28.2	28.6	36.5	28.4	26.2	26.8	28.0	29.0	25.8	25.9	23.8	26.6	31.0	29.9	28.0	22.4	27.3	33.3	24.0	21.6	25.8	28.1	21.0	23.2	23.1	23.5	25.8	24.4	
Chillán	2004	Marzo	16.2	23.0	29.6	29.2	21.2	24.0	25.2	28.0	27.4	30.4	19.2	24.6	19.2	24.0	28.2	28.0	23.5	28.4	27.8	29.4	30.0	29.6	29.0	26.4	26.4	27.7	31.0	19.2	23.2	24.8	18.4	
Chillán	2005	Marzo	25.3	30.2	33.4	26.2	27.4	21.8	17.0	22.0	27.4	30.0	25.2	24.9	30.0	26.6	20.6	24.4	24.2	24.8	20.8	25.0	25.0	28.8	30.3	27.0	25.4	23.6	24.3	20.4	23.6	22.8	22.2	
Chillán	2006	Marzo	26.0	27.3	29.8	31.0	25.5	22.2	24.6	23.3	27.4	25.6	26.2	27.0	22.8	25.2	21.6	20.8	22.1	27.0	27.4	28.0	25.0	27.8	23.6	19.2	26.8	25.7	23.6	28.8	26.2	15.4	22.2	
Chillán	2007	Marzo	22.2	25.2	28.0	29.0	29.6	29.2	25.2	21.2	25.2	27.0	27.6	28.6	27.0	25.4	24.2	27.0	31.2	32.4	30.2	29.0	22.4	24.0	25.0	26.6	23.6	20.6	18.0	20.4	17.8	26.2	26.6	
Chillán	2008	Marzo	24.0	30.0	30.0	28.8	26.8	28.6	27.0	25.2	28.2	30.6	23.6	30.0	32.0	30.4	27.0	26.8	28.4	28.8	25.4	28.6	29.6	31.0	25.8	24.4	22.4	25.6	24.2	26.4	24.0	26.6	26.6	
Chillán	2009	Marzo	21.4	27.0	28.4	28.2	30.0	31.6	31.2	34.6	37.8	30.0	31.2	31.2	30.4	27.0	31.6	24.8	29.8	30.4	29.8	29.8	28.2	26.8	29.4	29.6	28.8	27.4	27.8	23.4	21.4	23.2	25.8	
Chillán	2010	Marzo	25.4	23.4	26.6	26.6	28.4	32.0	26.8	22.6	30.6	30.0	27.6	22.4	26.4	24.6	27.6	25.0	23.4	25.0	27.8	25.2	22.0	21.6	24.4	28.8	29.8	27.0	29.0	25.6	28.0	31.6	22.6	
Chillán	2011	Marzo	32.4	29.0	30.4	33.0	28.6	24.4	29.6	32.0	29.0	27.0	19.0	19.0	19.0	22.0	19.0	23.2	20.8	26.0	28.0	26.4	24.2	22.0	22.2	24.8	20.6	19.0	21.0	25.0	24.4	25.0	23.2	
Los Ángeles	2000	Febrero	23.4	24.6	28.2	25.4	19.6	25.0	28.2	21.0	20.4	17.6	23.0	21.6	24.4	30.6	24.8	25.4	25.2	28.6	33.4	34.2	32.6	29.0	30.2	27.8	22.6	14.8	16.4	21.0	22.4			
Los Ángeles	2001	Febrero	25.4	22.4	27.6	32.8	29.2	28.8	27.4	29.0	20.0	21.2	24.8	32.0	28.2	29.2	29.2	30.0	32.6	32.2	32.2	29.2	28.2	27.0	27.2	26.4	29.6	27.2	27.4	26.0				
Los Ángeles	2002	Febrero	33.6	37.4	31.0	31.9	37.2	29.6	32.0	26.5	29.9	27.2	29.4	31.1	31.4	27.0	30.6	33.4	27.4	31.0	37.7	40.1	33.8	31.6	32.2	34.4	28.0	13.6	19.8	22.6				
Los Ángeles	2003	Febrero	29.6	29.4	29.0	29.0	27.0	24.8	27.4	29.0	30.0	30.2	29.0	30.0	34.0	23.0	24.5	28.2	25.2	21.2	20.1	27.0	34.0	33.2	34.6	32.6	26.6	24.4	26.0	26.8				
Los Ángeles	2004	Febrero	30.8	26.8	30.8	34.0	36.6	26.6	27.4	26.2	27.0	31.8	30.2	29.0	30.4	29.6	30.2	23.2	24.2	27.5	35.6	36.0	32.4	32.6	33.2	28.8	28.0	30.6	24.0	25.4	27.4			
Los Ángeles	2005	Febrero	34.2	36.0	29.0	31.4	30.0	26.0	29.4	32.4	38.2	36.4	30.8	22.0	27.0	30.4	31.0	32.0	32.5	31.2	29.6	32.0	33.0	31.0	29.8	32.6	33.0	31.4	28.8	25.2				
Los Ángeles	2006	Febrero	33.2	31.0	29.2	29.0	28.6	33.8	27.5	29.6	32.8	37.0	33.3	32.4	37.2	30.0	25.0	27.2	27.2	30.0	32.0	32.0	26.6	24.0	28.0	31.6	31.2	20.4	23.2	25.0				
Los Ángeles	2007	Febrero	34.0	34.6	32.0	34.1	30.0	24.8	25.0	27.3	31.2	38.2	26.0	29.2	26.8	25.6	14.4	19.6	20.8	24.0	25.6	29.0	22.0	21.8	26.0	28.8	26.2	25.0	25.4	21.0				
Los Ángeles	2008	Febrero	31.0	32.0	37.0	23.8	31.6	28.0	35.5	30.2	27.0	32.5	38.3	33.6	29.6	28.2	30.2	30.2	31.2	33.4	34.4	33.8	31.8	31.2	33.0	N/D	33.8	32.8	32.4	28.0				
Los Ángeles	2009	Febrero	31.2	25.0	28.2	28.2	24.3	26.0	28.0	30.0	33.0	29.2	28.7	30.6	29.0	34.0	29.0	25.2	31.8	30.0	20.6	23.4	26.0	28.6	30.6	33.6	33.5	33.0	37.6	27.5				
Los Ángeles	2010	Febrero	28.4	26.3	21.0	24.2	26.0	19.0	22.6	25.4	25.8	26.8	30.2	30.2	27.8	26.8	26.2	28.6	20.2	22.4	24.2	26.0	26.4	24.2	25.0	33.2	18.8	22.8	31.8	29.9				
Los Ángeles	2011	Febrero	29.5	24.5	25.0	28.0	29.2	29.8	32.4	33.6	32.2	30.4	23.5	19.4	25.4	33.4	31.2	22.0	27.0	35.6	33.4	27.6	24.4	26.5	25.0	32.2	31.8	32.6	32.8	33.8				
Los Ángeles	2000	Marzo	23.6	24.4	25.2	26.4	25.6	28.2	28.6	29.4	17.4	27.0	24.6	19.0	20.0	24.0	22.4	19.9	21.4	25.2	22.7	20.6	23.4	24.0	19.8	24.2	24.2	18.8	16.4	23.4	24.2	19.4	23.6	
Los Ángeles	2001	Marzo	26.2	26.6	30.2	25.0	22.6	25.2	27.0	25.4	22.2	12.2	17.2	20.9	23.6	26.4	26.8	28.2	25.8	21.8	20.6	19.8	20.1	22.4	25.2	26.4	26.8	24.2	20.0	20.6	27.4	20.8	20.4	
Los Ángeles	2002	Marzo	25.0	26.2	31.8	25.0	29.0	27.0	25.6	23.2	18.4	21.8	26.4	28.4	20.4	15.6	20.0	20.8	17.2	16.0	24.0	28.8	21.4	23.2	24.2	21.8	20.4	23.4	23.0	23.2	22.4	27.6		
Los Ángeles	2003	Marzo	27.6	N/D	31.0	25.6	30.0	36.2	29.6	29.6	29.0	26.4	28.6	25.4	26.0	19.6	24.9	29.4	30.6	30.6	23.3	27.4	32.0	25.9	21.5	26.1	26.4	18.8	23.4	22.6	25.5	27.2	24.4	
Los Ángeles	2004	Marzo	19.0	23.2	28.4	30.0	23.0	24.0	24.4	26.6	26.0	34.2	18.0	24.6	19.0	25.0	28.4	23.2	23.6	28.4	26.7	30.0	30.2	29.6	29.4	26.8	25.2	26.8	31.2	16.8	22.4	25.0	16.4	
Los Ángeles	2005	Marzo	24.4	30.4	34.0	26.2	27.0	24.2																										

Curico	2000	Febrero	28.4	29.6	33.0	30.0	29.4	28.6	31.3	24.4	29.2	28.4	27.5	24.4	26.0	30.8	26.6	27.4	27.3	27.6	30.8	30.4	31.4	24.4	29.0	29.4	30.0	30.0	21.6	24.6	26.3			
Curico	2001	Febrero	28.2	26.7	27.7	33.3	34.2	31.0	30.0	30.0	30.0	27.3	28.0	30.8	30.6	30.0	30.6	33.2	32.4	31.4	28.8	27.4	30.3	30.9	28.4	30.7	32.0	30.0	28.9	28.3				
Curico	2002	Febrero	32.8	35.0	32.0	33.0	28.6	29.8	31.6	27.6	30.8	29.3	30.2	31.8	31.2	29.3	31.0	30.6	29.1	28.4	32.2	29.0	27.0	30.7	31.2	32.8	31.8	30.5	29.0	23.0				
Curico	2003	Febrero	31.1	30.4	29.3	30.7	28.8	29.2	28.8	29.6	30.6	31.8	30.0	30.8	34.6	25.3	25.4	29.8	28.2	27.5	21.0	26.4	32.4	32.4	34.6	33.0	24.0	29.2	26.2	27.2				
Curico	2004	Febrero	32.5	28.6	30.2	32.0	34.8	29.4	28.5	30.1	31.0	31.9	28.6	30.4	31.6	31.1	29.6	25.6	27.0	29.6	33.6	25.4	29.4	29.9	32.5	29.8	28.6	29.0	29.0	28.7	30.8			
Curico	2005	Febrero	33.6	31.9	29.4	32.2	28.6	29.0	30.6	32.4	37.4	31.0	21.3	23.2	29.2	29.6	30.0	32.6	27.3	28.8	31.0	32.9	31.8	31.8	31.6	31.8	33.0	33.8	26.7	22.2				
Curico	2006	Febrero	27.0	24.6	29.0	31.2	30.8	31.6	26.6	29.2	32.4	32.8	30.6	31.2	32.0	31.6	29.4	31.6	29.8	31.6	31.4	26.2	24.0	28.6	32.5	30.7	17.0	24.6	25.8					
Curico	2007	Febrero	33.6	32.8	28.2	32.0	24.2	26.2	28.2	30.4	31.2	33.0	26.8	30.2	27.8	28.0	27.0	16.2	23.1	26.0	26.4	24.4	25.4	25.2	27.4	28.8	28.7	28.0	26.4	23.4				
Curico	2008	Febrero	31.4	32.8	31.7	29.0	31.4	26.1	28.6	30.2	28.2	32.9	34.2	33.2	30.6	30.0	32.0	31.6	28.4	32.0	32.0	32.4	29.6	31.4	30.4	30.4	30.8	28.4	27.8	31.8	31.8			
Curico	2009	Febrero	31.4	30.2	30.9	32.7	26.5	27.9	29.4	30.2	29.4	31.4	31.2	29.6	30.2	33.1	30.6	29.0	31.7	29.8	28.4	28.6	27.4	30.0	31.6	31.0	31.8	31.3	27.6	27.0				
Curico	2010	Febrero	30.0	28.6	22.6	25.4	28.9	27.5	28.6	29.8	29.0	29.8	31.0	31.6	29.8	28.8	28.1	31.6	27.9	27.4	26.7	28.8	29.8	21.6	27.1	29.8	18.2	26.2	31.2	26.8				
Curico	2011	Febrero	30.2	30.2	26.8	28.8	32.0	29.6	30.8	30.8	30.1	26.0	24.8	25.2	29.3	34.8	28.4	22.8	28.8	32.4	29.2	27.4	29.4	28.2	26.0	29.0	30.8	32.0	31.4	31.7				
Curico	2000	Marzo	26.3	26.3	26.3	27.6	28.0	31.0	30.4	26.6	22.6	28.0	26.6	24.0	25.6	27.0	25.6	23.8	26.6	29.5	24.8	21.8	25.6	26.8	22.0	26.8	27.4	20.4	20.0	23.0	27.2	23.2	22.5	
Curico	2001	Marzo	28.1	28.6	31.0	29.3	27.0	27.6	28.5	29.1	26.6	26.9	30.7	27.0	26.0	27.1	30.1	30.0	28.0	25.7	25.4	25.9	18.2	17.3	19.6	28.5	28.4	27.0	25.0	24.5	26.5	27.6	26.4	
Curico	2002	Marzo	26.3	28.8	25.8	26.2	28.6	28.2	28.3	29.2	29.4	26.0	27.0	32.4	17.8	21.4	17.2	20.8	17.9	22.0	24.8	27.2	26.8	24.0	23.4	23.2	23.0	24.2	26.3	26.0	20.4	22.6	25.6	
Curico	2003	Marzo	27.8	29.0	31.7	25.1	22.8	31.0	22.6	25.0	28.4	27.7	30.0	26.4	28.2	18.0	26.6	29.3	30.6	25.2	18.2	26.4	29.8	25.2	25.1	27.5	26.8	26.0	22.3	24.0	26.3	26.0	25.0	
Curico	2004	Marzo	23.3	24.6	28.2	29.5	23.8	25.6	24.1	29.4	26.7	30.3	20.3	27.8	21.2	26.0	28.4	29.8	25.4	27.2	27.0	28.1	29.2	29.0	28.4	27.2	26.2	28.0	30.2	18.2	25.2	21.0	22.2	
Curico	2005	Marzo	25.0	29.6	32.2	26.8	27.8	20.0	18.0	23.2	26.7	31.6	23.6	25.3	29.6	28.3	24.8	25.4	25.0	25.9	26.0	27.2	23.7	28.7	29.6	26.6	22.2	23.6	23.6	20.8	21.7	22.2	17.8	
Curico	2006	Marzo	27.2	27.2	29.6	32.2	28.4	26.1	25.8	26.6	27.6	28.3	27.4	29.0	26.8	27.2	22.4	25.2	24.4	26.0	27.0	28.4	27.6	27.3	26.6	21.6	25.6	26.2	23.6	28.8	26.0	18.2	22.0	
Curico	2007	Marzo	23.6	24.8	28.6	30.2	29.4	29.0	23.7	25.0	25.5	27.6	28.8	28.6	29.2	24.0	22.4	26.6	31.2	30.0	27.4	30.0	22.0	25.4	25.4	27.8	24.0	18.2	19.2	19.0	14.8	17.8	27.3	
Curico	2008	Marzo	30.0	31.0	31.6	31.4	28.4	25.4	23.4	27.4	29.6	29.4	22.0	29.6	30.9	29.2	28.6	26.8	27.6	31.4	26.2	28.2	28.2	30.4	26.0	26.6	26.0	27.0	24.4	27.2	25.4	24.0	24.3	
Curico	2009	Marzo	27.0	29.8	26.0	28.8	30.6	30.8	30.5	31.6	33.8	26.8	27.8	31.0	30.2	29.4	30.0	27.6	27.0	31.0	28.2	28.2	27.8	26.4	28.4	28.6	26.4	27.4	28.1	28.3	27.2	21.8	27.2	
Curico	2010	Marzo	28.2	25.8	28.8	28.6	29.0	33.2	27.0	25.6	28.4	31.0	28.6	22.6	27.4	27.4	28.1	26.0	24.0	26.2	27.0	28.0	23.9	23.6	26.4	27.2	29.6	28.0	27.4	24.8	22.5	28.2	24.2	
Curico	2011	Marzo	32.0	29.8	30.6	32.0	28.4	25.7	28.0	31.3	30.0	29.2	27.5	20.0	23.0	18.0	14.6	23.0	23.5	25.0	26.6	28.2	25.0	25.4	23.1	25.4	22.6	21.8	17.3	25.0	26.2	26.7	26.0	
Temuco	2000	Febrero	19.0	22.8	23.0	20.4	19.5	23.2	27.2	17.2	19.4	18.7	20.0	19.2	23.2	30.0	30.2	24.2	21.0	27.0	32.2	30.6	28.0	25.4	26.0	23.0	21.2	14.6	17.3	19.0	20.2			
Temuco	2001	Febrero	20.9	20.8	25.1	29.9	24.0	23.0	24.3	25.4	19.7	21.6	22.6	29.6	24.5	26.8	27.3	29.8	28.3	28.6	27.1	25.6	24.5	23.7	24.4	25.2	28.3	23.6	26.9	24.1				
Temuco	2002	Febrero	30.4	33.1	24.6	30.2	34.8	27.0	29.9	23.4	24.0	24.1	24.9	26.5	25.1	24.4	28.1	26.9	19.0	28.8	34.0	37.0	32.1	27.8	30.2	29.3	21.0	16.8	17.8	18.5				
Temuco	2003	Febrero	24.8	25.9	25.5	23.8	22.8	22.0	23.4	25.2	26.4	25.9	24.8	26.1	26.4	19.3	22.3	24.0	23.7	18.3	18.1	24.6	30.3	29.0	28.9	26.6	25.5	18.9	23.1	23.2				
Temuco	2004	Febrero	24.7	23.2	29.2	34.3	37.4	35.5	24.5	23.1	23.6	28.7	24.6	24.8	25.4	26.1	28.2	21.1	21.9	24.2	32.2	35.7	32.5	29.0	27.6	20.8	23.3	30.5	24.2	24.7	24.4			
Temuco	2005	Febrero	31.2	35.2	27.0	29.4	28.7	25.2	22.3	30.6	38.6	36.8	30.4	21.3	25.3	28.1	28.6	29.8	30.0	27.4	27.3	28.1	28.1	24.3	26.6	29.4	29.8	28.1	26.6	29.7				
Temuco	2006	Febrero	27.1	27.4	25.1	25.2	24.3	29.2	22.1	25.3	28.0	33.8	28.3	28.6	35.9	29.3	24.9	25.2	27.3	25.8	28.6	29.0	27.0	21.4	25.7	27.4	24.0	19.1	19.6	21.6				
Temuco	2007	Febrero	30.9	30.4	29.6	29.8	25.1	21.5	21.9	24.7	28.0	37.5	25.8	26.8	20.9	23.9	19.2	19.2	19.9	20.7	27.7	27.4	20.1	21.3	23.3	25.8	23.2	22.4	21.8	19.1				
Temuco	2008	Febrero	28.5	33.0	36.3	30.3	29.5	29.1	30.4	25.0	24.6	30.5	33.2	27.5	26.0	24.8	25.0	25.3	27.0	27.1	27.7	32.2	31.1	30.4	27.2	28.7	29.7	29.6	27.0	30.2	27.4			
Temuco	2009	Febrero	25.6	23.3	26.3	24.3	20.7	22.4	24.9	25.9	30.6	23.5	25.1	26.2	25.5	30.1	27.5	23.4	28.2	24.8	17.0	21.1	23.5	25.6	27.0	28.9	27.3	28.9	32.8	27.5				
Temuco	2010	Febrero	21.5	24.6	18.4	21.3	23.9	17.9	20.8	22.8	18.4	22.4	25.8	25.3	23.8	22.7	20.7	24.1	18.4	19.8	20.8	22.6	17.7	20.7	21.7	31.9	23.8	21.7	29.6	31.5				
Temuco	2011	Febrero	23.2	20.6	18.1	23.0	24.5	27.1	27.9	36.9	29.3	33.5	24.3	20.3	21.8	29.8	25.4	26.3	22.2	32.1	34.7	24.0	18.0	20.4	23.2	29.2	27.9	27.4	27.7	29.1				
Temuco	2000	Marzo	21.3	19.8	22.2	22.6	22.9	25.4	24.8	27.0	17.2	24.0	23.7	18.4	18.3	19.6	17.0	18.0	18.0	21.2	17.2	17.0	19.0	15.0	17.5	21.6	17.4	15.8	14.2	19.4	19.8	17.0	21.6	
Temuco	2001	Marzo	23.5	24.7	26.9	20.7	21.8	22.1	23.5	25.4	22.5	18.5	13.8	16.6	22.7	25.1	26.8	24.5	19.8	18.3	20.1	17.8	17.3	26.5	24.6	27.7	24.3	21.6	20.6	19.0	29.1	25.3	17.8	
Temuco	2002	Marzo	22.8	24.0	21.3	22.5	23.1	23.4	20.5	16.7	13.1	19.1	23.3	25.4	18.5	17.7	20.5	16.7	19.5	20.6	22.1	26.1	21.5	21.2	20.4	17.0	17.8	17.7	23.4	18.4	21.0	20.8	28.4	
Temuco	2003	Marzo	23.7	25.0	28.3	27.7	27.9	31.7	28.7	27.9	26.3	23.4	26.2	23.1	23.0	16.9	23.0	27.9	27.7	26.8	18.1	23.3	28.2	22.9	21.0	26.1	25.2	22.1	20.7	21.6	26.2	26.1	24.5	
Temuco	2004	Marzo	24.4	22.4	26.7	25.6	21.2	20.7	22.4	22.5	22.0	34.8	26.4	19.5	18.4	21.0	26.1	18.3	20.9	24.1	23.4	26.9	26.0	24.0	22.5	23.0	21.3	23.1	25.2	20.2	19.9	23.6	17.3	
Temuco	2005	Marzo	29.7	27.1	27.6	28.9	24.0	24.1	22.6	20.0	23.0																							

Santo Domingo	2000	Febrero	21.9	23.6	22.3	20.2	22.2	22.6	19.2	21.1	20.8	21.8	22.4	23.3	22.9	20.0	21.0	21.1	21.2	21.6	20.3	19.5	20.5	18.8	19.6	20.2	20.8	20.4	23.2	19.2				
Santo Domingo	2001	Febrero	21.0	20.3	20.1	20.3	16.5	19.8	20.1	19.5	21.1	25.0	23.9	19.7	20.0	17.1	19.2	19.8	19.1	20.9	21.0	20.7	21.0	20.7	20.6	21.0	20.2	20.6	19.4	20.9				
Santo Domingo	2002	Febrero	22.6	19.9	19.8	18.8	20.4	21.0	21.2	22.2	21.4	20.4	21.4	20.1	19.6	20.0	20.2	20.5	18.0	18.4	18.9	20.4	22.4	22.7	20.9	21.6	21.8	21.3	21.7	23.2				
Santo Domingo	2003	Febrero	19.5	22.2	20.2	20.6	19.8	20.6	19.3	16.4	17.0	17.2	17.9	17.4	17.2	19.6	24.6	19.0	16.6	20.3	21.5	18.2	18.2	17.6	15.6	15.0	17.8	19.4	19.8	19.6				
Santo Domingo	2004	Febrero	18.4	19.3	18.4	18.0	18.6	20.7	21.3	20.9	20.8	21.3	19.3	18.6	18.0	19.7	20.6	20.6	19.4	25.2	20.1	19.0	20.6	20.6	18.1	17.4	18.8	21.3	21.9	21.2	20.8			
Santo Domingo	2005	Febrero	21.7	19.8	20.4	20.7	21.1	21.0	20.0	20.2	19.8	19.6	19.4	23.6	23.4	21.9	21.0	20.9	20.6	20.5	21.2	19.2	18.9	21.0	21.3	21.8	24.5	21.4	21.6	20.8				
Santo Domingo	2006	Febrero	N/D	22.0	21.8	19.8	21.2	20.9	20.7	22.1	20.4	20.8	20.8	19.4	21.3	20.3	22.6	23.5	22.4	22.4	22.7	22.3	23.0	19.8	20.6	17.2	18.7	19.3	22.8	19.0				
Santo Domingo	2007	Febrero	N/D	20.7	20.9	21.7	19.0	22.4	22.8	22.8	22.3	21.3	22.0	20.6	22.3	22.5	21.5	21.1	18.4	19.2	20.0	20.1	20.5	19.9	20.4	20.9	21.2	19.4	20.7	18.5				
Santo Domingo	2008	Febrero	21.6	21.7	20.0	21.9	22.4	22.6	22.8	23.1	22.5	24.0	20.3	20.8	20.8	22.4	22.7	21.5	19.8	19.9	19.6	20.9	21.3	21.2	20.8	21.3	21.8	20.4	20.4	20.6	19.3			
Santo Domingo	2009	Febrero	20.3	17.8	20.1	23.0	22.4	23.5	20.5	18.9	20.2	21.7	22.6	25.1	21.8	22.2	20.4	20.5	20.6	21.8	21.4	19.6	20.0	19.9	24.1	19.3	19.9	17.4	18.0	19.6				
Santo Domingo	2010	Febrero	21.4	18.3	19.3	19.4	19.6	21.0	22.2	22.4	21.4	21.8	20.0	20.4	21.0	21.2	20.0	18.4	18.4	21.0	22.0	21.9	19.6	18.9	18.4	19.0	20.0	22.0	19.8	19.4				
Santo Domingo	2011	Febrero	22.0	22.2	21.0	21.2	20.6	21.0	21.0	21.0	21.0	22.0	21.0	21.0	22.0	22.7	21.6	21.3	21.6	21.0	20.0	20.1	21.0	20.8	20.6	21.2	21.4	21.4	18.0	20.0				
Santo Domingo	2000	Marzo	19.0	18.3	19.4	19.2	21.0	18.2	18.0	17.2	20.0	19.6	19.0	21.9	20.2	19.3	18.8	18.9	19.4	18.0	19.4	19.7	23.4	16.4	20.0	24.0	18.0	19.2	24.9	20.1	15.6	15.3	16.6	
Santo Domingo	2001	Marzo	21.6	18.8	19.4	19.9	20.1	23.1	18.3	16.8	22.7	21.8	17.8	22.4	20.4	19.9	19.8	19.7	19.3	24.2	18.7	16.9	17.5	18.8	21.6	17.7	17.6	16.9	17.5	18.1	18.1	19.2	22.0	
Santo Domingo	2002	Marzo	21.4	19.4	21.1	20.8	20.8	18.2	21.4	20.4	20.8	19.7	19.6	20.1	19.8	21.1	23.1	22.0	21.8	21.4	24.2	23.4	20.2	21.0	21.1	24.2	23.7	20.5	21.2	21.6	22.8	22.8		
Santo Domingo	2003	Marzo	18.2	18.0	18.0	18.4	19.3	15.2	19.2	20.4	19.4	17.6	16.6	16.3	17.2	18.2	19.2	20.5	20.2	18.0	17.8	19.2	19.0	20.6	21.8	22.4	19.0	18.9	16.8	19.3	18.4	17.4	18.0	
Santo Domingo	2004	Marzo	20.8	25.0	24.2	21.0	21.8	25.5	22.9	18.8	19.9	18.3	21.4	18.6	18.4	21.2	20.6	21.8	24.2	19.8	18.0	18.8	19.7	16.6	17.8	21.0	20.1	22.0	19.2	20.8	21.4	24.0	21.9	
Santo Domingo	2005	Marzo	22.7	22.4	19.8	23.7	21.4	19.1	18.2	20.2	21.5	21.0	18.6	24.0	23.3	17.4	21.2	20.4	20.5	25.6	19.9	21.2	18.8	17.4	19.2	17.7	17.5	17.9	19.1	20.0	17.4	15.8	16.5	
Santo Domingo	2006	Marzo	17.7	20.2	19.6	17.2	19.0	20.4	20.3	20.3	20.0	18.8	23.0	18.9	21.3	20.0	19.2	20.2	23.8	23.4	14.4	16.8	17.9	18.7	18.0	23.4	20.8	18.5	19.0	17.8	16.0	17.3	17.5	
Santo Domingo	2007	Marzo	18.2	18.6	16.5	18.5	16.8	19.7	18.8	20.0	20.3	19.7	18.5	21.6	17.0	20.1	17.0	18.3	26.5	20.6	19.2	18.5	20.0	21.7	21.4	19.4	18.7	18.7	18.8	20.1	18.3	22.0	19.8	
Santo Domingo	2008	Marzo	22.0	22.8	20.2	20.4	21.3	19.5	19.0	21.1	20.1	19.8	21.9	20.8	20.3	20.8	21.4	21.6	24.1	18.7	19.7	23.4	18.8	17.4	21.8	20.8	20.0	21.2	18.6	16.2	19.3	18.7	18.4	
Santo Domingo	2009	Marzo	21.5	20.6	22.2	19.8	22.3	23.0	24.3	19.4	18.2	18.4	19.6	16.4	18.2	29.1	22.4	21.4	21.8	19.4	18.0	14.0	15.0	17.8	15.6	16.8	14.9	14.5	15.7	16.4	18.2	22.4	31.4	
Santo Domingo	2010	Marzo	20.9	23.8	20.8	20.1	19.6	19.3	19.8	24.2	20.2	19.5	19.4	19.5	20.1	18.8	20.6	20.0	20.3	19.2	21.2	18.8	20.2	19.6	20.0	20.0	18.6	19.8	17.6	16.4	19.0	18.4	18.2	
Santo Domingo	2011	Marzo	18.4	20.8	20.2	20.4	21.1	20.3	19.4	19.6	21.0	20.2	22.5	22.9	19.4	18.0	17.6	21.5	24.5	20.0	15.7	16.0	18.4	20.2	18.0	17.0	17.9	24.0	19.2	18.8	17.0	19.2	22.2	
Valdivia	2000	Febrero	17.8	20.6	21.6	15.4	20.0	22.0	24.2	14.8	18.0	19.8	16.3	18.8	22.3	27.5	24.8	22.8	19.9	25.4	29.8	30.8	28.2	23.8	24.8	21.0	19.7	17.5	16.0	19.8	20.9			
Valdivia	2001	Febrero	17.8	19.4	24.6	29.4	23.0	20.8	23.8	23.8	18.8	19.8	21.0	27.0	22.8	25.6	26.8	27.6	25.0	26.4	26.8	21.0	21.6	21.4	21.4	25.1	21.8	23.6	21.4					
Valdivia	2002	Febrero	29.4	29.8	23.8	27.4	34.6	25.8	30.0	21.4	22.4	22.0	23.0	23.8	22.1	23.0	25.4	25.8	19.2	27.0	30.4	32.0	31.2	26.0	28.0	25.8	15.0	19.0	18.0	19.0				
Valdivia	2003	Febrero	22.6	22.6	24.9	22.6	22.4	20.6	23.2	22.9	24.4	24.8	24.2	24.4	26.9	18.4	22.8	23.0	21.0	17.0	18.2	23.0	27.2	23.8	26.9	25.2	17.6	18.4	20.8	20.8				
Valdivia	2004	Febrero	24.6	23.4	28.0	31.6	35.1	33.9	22.4	20.0	22.4	27.4	24.2	23.4	24.8	25.4	25.0	19.4	20.0	23.8	28.3	34.1	33.6	29.0	25.0	19.6	24.4	27.8	21.4	20.4	21.0			
Valdivia	2005	Febrero	27.8	32.4	28.9	30.2	27.3	23.0	20.6	25.8	35.2	35.4	31.2	21.0	25.2	25.6	27.0	29.0	28.2	27.4	26.7	27.8	26.4	21.0	24.4	28.0	27.2	27.0	24.0	28.4				
Valdivia	2006	Febrero	27.2	25.0	23.2	22.2	24.7	28.6	21.4	24.8	27.8	31.4	29.8	27.6	32.4	29.8	25.4	23.0	22.0	24.1	27.4	26.0	23.3	20.0	24.0	27.4	21.6	18.6	18.6	19.6				
Valdivia	2007	Febrero	29.5	30.2	28.0	28.1	23.4	18.6	20.0	23.6	26.6	33.4	21.2	21.7	19.8	20.6	16.8	18.4	18.5	19.2	23.0	25.8	17.9	19.9	21.5	23.4	21.8	22.0	20.7	17.3				
Valdivia	2008	Febrero	27.2	30.5	34.6	30.0	29.2	28.0	29.5	22.8	24.2	25.2	31.8	25.6	20.6	21.4	23.4	21.8	21.6	26.2	27.8	30.2	28.9	27.8	26.6	28.6	29.4	30.0	25.2	26.4	27.2			
Valdivia	2009	Febrero	23.3	22.5	25.0	21.6	19.6	22.2	24.8	25.4	30.3	21.5	23.4	23.8	25.1	28.6	22.5	20.0	23.5	20.2	19.1	20.4	23.5	25.6	27.2	27.6	28.8	27.7	31.0	27.4				
Valdivia	2010	Febrero	20.8	19.4	16.6	15.6	19.6	17.2	18.6	17.2	19.6	21.2	24.5	24.1	22.6	21.6	19.6	21.5	18.4	18.6	20.0	21.6	20.0	20.0	20.6	29.0	23.0	23.2	24.0	28.8				
Valdivia	2011	Febrero	20.2	20.0	20.1	22.1	23.4	24.7	25.2	32.2	32.1	34.0	21.4	17.5	20.8	30.4	22.8	22.4	22.2	29.4	32.9	23.8	18.8	20.6	21.1	27.8	26.9	24.7	27.4	27.2				
Valdivia	2000	Marzo	20.0	19.8	21.8	22.8	22.4	22.6	25.0	26.4	21.8	23.8	21.5	19.8	17.6	19.4	17.2	18.0	19.0	19.0	17.8	15.1	17.8	12.1	16.8	20.2	17.0	15.8	14.8	18.0	17.4	16.5	20.0	
Valdivia	2001	Marzo	21.0	22.0	21.8	20.0	19.0	20.8	20.0	22.2	21.4	17.8	12.8	17.4	21.0	22.4	22.2	23.0	18.4	17.0	17.8	16.4	17.4	23.8	22.8	24.6	18.6	19.2	21.0	17.6	20.4	20.2	17.2	
Valdivia	2002	Marzo	21.1	23.1	20.8	21.5	20.4	21.9	19.2	15.4	15.0	17.2	21.9	20.6	17.2	18.4	19.7	19.6	20.7	21.0	20.4	25.5	21.6	21.6	17.2	16.5	17.8	14.6	21.4	18.2	18.8	19.4	23.4	
Valdivia	2003	Marzo	22.4	24.2	26.2	26.2	27.2	29.3	28.8	26.2	26.8	20.6	22.2	22.6	21.0	19.2	21.4	24.8	25.8	24.3	20.3	20.8	25.8	22.2	17.0	23.6	18.9	19.8	19.1	20.9	24.4	24.8	22.0	
Valdivia	2004	Marzo	19.4	21.0	24.2	23.6	19.2	19.4	21.6	22.4	21.0	30.2	27.2	20.0	18.4	20.2	23.6	19.0	20.0	22.4	23.0	25.4	26.1	23.9	20.4	21.0	20.2	20.6	24.4	16.0	20.2	23.4	20.6	
Valdivia	2005	Marzo	22.0	24.2	24.4	21.2	22.6	17.4	16.7	18.9	19.7																							

	2000	Febrero	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D						
Rodelillo	2001	Febrero	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D						
Rodelillo	2002	Febrero	24.8	19.5	24.0	20.2	18.9	21.4	24.0	24.4	22.9	20.8	24.0	20.0	21.6	18.6	19.6	22.0	22.3	23.4	18.1	18.8	21.8	21.4	20.0	19.0	16.2	18.6	18.6	25.8				
Rodelillo	2003	Febrero	21.8	29.1	26.6	28.4	22.1	26.1	26.6	21.0	20.6	21.2	19.5	19.9	15.4	23.0	27.8	23.6	18.0	24.0	22.0	22.9	22.5	24.0	18.6	17.2	22.2	23.8	23.0	N/D				
Rodelillo	2004	Febrero	20.2	18.6	24.0	22.0	19.0	19.4	20.8	25.5	27.4	N/D	18.0	21.8	19.0	18.4	16.6	24.4	26.0	30.3	17.8	17.6	19.2	24.6	22.8	19.2	18.4	22.6	24.0	26.5	24.1			
Rodelillo	2005	Febrero	22.9	17.8	18.8	24.6	18.3	23.0	23.0	22.2	16.9	17.4	17.3	21.8	24.0	24.7	24.4	19.6	20.0	23.8	20.6	18.6	20.4	27.0	27.8	22.8	30.8	17.8	19.0	18.4				
Rodelillo	2006	Febrero	20.4	20.9	20.8	19.9	23.6	19.6	23.4	26.4	19.4	19.4	19.2	16.0	18.0	19.3	23.1	25.0	25.6	24.6	23.8	18.5	23.4	24.6	26.6	18.9	19.5	21.8	24.0	25.4				
Rodelillo	2007	Febrero	21.8	24.2	21.6	19.0	18.6	21.8	27.0	20.4	21.4	20.2	22.2	23.4	22.1	24.0	23.0	17.9	22.5	25.5	22.2	18.0	23.0	24.8	28.2	29.6	23.6	19.8	18.3	18.8				
Rodelillo	2008	Febrero	26.0	19.2	21.0	21.0	22.0	23.4	24.6	24.9	28.5	27.1	20.0	20.2	21.6	28.0	28.0	26.8	24.7	28.0	24.0	18.1	19.4	21.0	N/D	N/D	23.5	23.8	20.0	21.6	21.5	24.6		
Rodelillo	2009	Febrero	17.2	20.2	28.7	27.6	26.4	27.8	23.1	21.4	18.0	26.4	32.0	25.4	27.6	18.0	19.9	27.2	23.3	21.6	23.7	26.4	22.2	28.0	19.8	20.0	19.8	15.6	16.0	15.8				
Rodelillo	2010	Febrero	25.0	20.0	22.0	22.0	22.0	21.0	25.0	30.0	27.0	22.0	20.0	25.0	29.0	20.0	20.0	19.0	19.0	24.0	24.0	26.0	21.0	14.0	23.0	18.0	19.0	22.0	18.0	20.2				
Rodelillo	2011	Febrero	27.5	26.8	26.2	26.8	19.0	20.4	22.4	21.4	21.4	24.0	24.1	21.8	28.4	23.3	20.2	22.3	26.3	19.4	20.6	20.6	20.8	22.8	20.7	19.0	22.5	23.6	17.8	23.8				
Rodelillo	2000	Marzo	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		
Rodelillo	2001	Marzo	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		
Rodelillo	2002	Marzo	25.7	25.6	24.6	28.8	27.4	25.8	27.0	25.0	26.7	26.2	26.0	20.0	16.6	18.4	21.4	23.6	24.9	22.1	28.6	27.7	23.6	26.0	25.4	26.2	25.7	26.9	27.2	20.0	17.8	23.6	25.2	
Rodelillo	2003	Marzo	22.2	20.6	15.2	15.8	20.0	16.0	16.2	20.0	21.1	19.0	15.4	16.2	15.5	17.7	25.6	23.0	15.5	16.4	16.1	18.7	14.4	18.0	21.4	28.1	22.5	24.8	21.3	23.7	20.8	19.4	19.3	
Rodelillo	2004	Marzo	19.6	26.0	27.4	21.2	25.2	25.6	27.0	18.8	20.2	16.5	19.7	19.8	17.7	23.4	27.8	27.7	27.2	28.0	21.5	19.3	17.2	18.9	24.0	25.5	18.8	27.4	10.3	16.8	21.2	21.8	18.6	
Rodelillo	2005	Marzo	22.0	28.5	24.8	27.8	27.4	18.4	20.0	23.7	28.8	23.6	17.8	24.9	28.1	19.4	21.4	24.4	24.0	26.2	23.8	26.4	21.5	21.0	23.8	18.0	18.9	19.6	20.8	22.4	21.4	17.2	17.6	
Rodelillo	2006	Marzo	22.6	22.5	28.3	18.4	22.0	25.8	24.4	26.2	27.2	22.4	29.3	19.4	25.4	23.6	20.4	24.0	26.0	21.4	18.4	17.5	21.4	19.7	20.4	23.8	21.5	23.5	27.3	19.0	14.6	15.8	19.5	
Rodelillo	2007	Marzo	24.2	27.4	21.8	27.7	16.1	19.1	19.0	25.0	25.5	27.0	23.4	28.2	18.4	21.0	19.6	27.4	32.2	17.1	18.4	15.2	16.5	20.6	24.9	19.0	17.5	17.8	15.8	18.1	24.0	17.8		
Rodelillo	2008	Marzo	27.7	28.8	24.5	24.2	22.9	18.0	18.4	23.9	25.2	20.4	23.2	22.8	22.6	19.0	26.8	25.4	28.8	20.4	25.3	25.4	19.4	17.3	20.1	22.7	24.2	27.0	25.6	19.9	20.7	23.2	23.4	
Rodelillo	2009	Marzo	20.0	20.4	18.4	26.8	31.2	24.5	31.9	24.2	18.1	16.3	21.6	20.2	17.8	29.4	21.4	24.7	23.0	15.3	18.2	19.4	16.8	17.6	17.2	15.2	15.4	13.6	16.3	21.7	24.4	26.8	31.2	
Rodelillo	2010	Marzo	19.4	23.8	24.5	26.0	26.9	19.5	21.0	24.8	24.0	17.5	16.2	19.2	19.6	20.4	19.4	18.0	20.6	21.3	25.3	20.4	22.4	22.4	27.2	23.0	18.4	25.0	26.7	23.6	23.3	20.0	19.4	
Rodelillo	2011	Marzo	18.7	24.1	19.0	19.0	19.6	21.4	19.6	19.6	21.8	20.0	21.6	22.2	23.6	17.1	16.6	24.1	24.8	23.7	20.2	17.7	24.8	25.4	23.2	21.9	20.4	22.5	22.4	23.4	23.8	27.1	26.8	
Pudahuel Santiago	2000	Febrero	27.5	29.4	31.1	27.3	28.2	31.4	29.0	29.1	29.1	31.4	28.5	16.3	26.5	30.9	25.5	29.2	29.1	30.1	28.0	30.7	29.6	25.3	28.1	29.8	29.3	29.8	24.5	28.7	27.9			
Pudahuel Santiago	2001	Febrero	30.4	30.5	31.5	31.9	33.0	33.0	32.4	32.0	29.9	31.2	31.6	30.9	31.4	31.4	32.6	31.7	30.9	28.8	28.9	27.8	30.9	28.7	26.6	31.9	31.4	29.4	30.3	29.0				
Pudahuel Santiago	2002	Febrero	33.5	32.7	31.0	31.6	25.9	27.9	28.9	27.5	28.7	27.7	29.9	30.3	29.5	29.0	28.7	29.0	27.8	29.9	29.9	27.6	28.1	30.8	31.0	30.0	30.5	29.4	30.3	26.9				
Pudahuel Santiago	2003	Febrero	33.5	31.2	30.5	31.1	31.6	29.8	30.5	30.6	30.3	29.5	28.0	32.2	32.8	26.0	29.9	30.4	30.3	26.8	25.1	25.5	30.7	30.7	33.9	30.5	28.4	27.2	27.6	28.0				
Pudahuel Santiago	2004	Febrero	29.5	29.8	28.0	30.0	33.0	32.9	28.1	28.4	32.0	32.4	29.4	30.0	30.1	30.2	30.1	27.3	28.0	31.0	32.5	33.5	27.0	30.0	30.6	30.8	28.0	27.0	26.9	27.1	28.2			
Pudahuel Santiago	2005	Febrero	31.0	31.4	29.9	30.0	30.7	28.0	28.0	34.0	34.1	34.5	30.7	22.4	27.2	28.3	30.0	32.1	30.3	30.0	31.0	31.0	31.2	31.0	31.6	31.7	35.4	35.7	32.7	25.9				
Pudahuel Santiago	2006	Febrero	23.1	25.4	28.4	29.2	31.2	28.5	28.1	30.9	32.2	30.4	29.7	27.4	30.4	30.2	29.8	31.4	30.7	30.1	30.0	29.0	27.6	24.4	29.6	30.6	28.2	22.8	26.7	28.2				
Pudahuel Santiago	2007	Febrero	32.0	32.2	27.0	30.0	30.4	25.0	29.1	29.8	30.0	30.5	29.9	29.0	29.3	27.0	24.0	25.0	22.4	27.0	27.3	27.3	22.6	27.0	30.0	33.0	33.1	29.8	27.0	27.2				
Pudahuel Santiago	2008	Febrero	29.8	30.7	30.0	28.6	29.2	26.1	30.0	28.5	29.5	33.3	32.5	31.8	29.7	30.8	31.6	30.9	29.1	31.9	32.4	28.3	27.5	28.6	28.6	27.7	29.1	27.1	26.9	31.3	30.4			
Pudahuel Santiago	2009	Febrero	30.1	27.9	31.7	31.3	30.0	32.0	28.7	32.4	30.2	31.7	34.8	33.1	31.8	32.0	29.8	30.7	32.9	30.4	28.6	29.5	25.9	31.4	31.8	29.1	30.4	29.5	27.6	22.7				
Pudahuel Santiago	2010	Febrero	32.7	32.2	28.2	28.0	29.6	28.3	28.6	32.0	33.2	32.3	33.3	32.2	33.5	33.8	31.0	31.9	30.5	29.4	29.0	30.2	31.6	29.0	30.0	30.3	22.5	27.0	27.0	22.7				
Pudahuel Santiago	2011	Febrero	32.0	33.4	31.0	31.4	32.5	32.6	30.6	30.5	30.4	20.4	24.0	24.5	30.6	34.0	27.0	28.0	31.0	31.1	31.7	28.4	28.0	29.0	29.1	27.6	29.0	32.0	31.5	31.0				
Pudahuel Santiago	2000	Marzo	27.8	26.9	29.1	29.5	31.4	30.5	29.1	26.2	25.3	28.2	27.5	25.0	26.0	28.4	28.1	27.5	29.7	29.1	25.0	25.0	31.1	29.2	24.8	30.7	26.0	24.6	23.7	31.0	26.5	25.3	26.5	
Pudahuel Santiago	2001	Marzo	30.6	30.8	30.9	30.9	30.2	31.7	29.4	29.3	25.4	27.7	30.9	26.9	30.5	31.1	29.1	29.7	29.4	25.5	29.5	25.3	15.9	17.8	22.5	27.0	27.5	25.1	27.7	30.8	28.7	24.8	24.2	
Pudahuel Santiago	2002	Marzo	30.0	31.1	30.4	30.0	31.0	30.9	30.3	29.7	30.0	30.0	30.9	31.2	32.6	25.3	25.7	25.1	25.4	29.0	32.0	32.2	29.2	29.1	27.5	28.1	28.0	28.1	28.7	26.1	27.2	30.1		
Pudahuel Santiago	2003	Marzo	28.6	30.0	31.2	26.2	19.9	32.5	25.5	27.2	29.0	30.0	27.1	27.0	28.4	25.2	27.5	32.6	29.3	25.6	20.4	30.0	28.9	26.2	25.0	28.6	29.5	27.6	24.0	26.0	26.7	26.5	27.3	
Pudahuel Santiago	2004	Marzo	29.0	27.5	34.0	34.7	30.1	26.5	29.3	29.8	29.1	28.4	29.3	26.0	26.8	26.6	30.0	30.1	30.0	31.0	31.4	31.5	31.4	29.0	29.2	31.0	31.3	30.6	30.4	30.0	25.0	25.4	21.0	
Pudahuel Santiago	2005	Marzo	25.3	31.7	33.1	30.8	31.6	24.5	17.7	25.4	31.1	31.1	22.5	22.0	31.1	21.1	28.8	24.7	26.4	25.7	29.4	30.2	26.9	28.0	29.4	33.0	30.0	28.5	21.0	25.8	25.4	24.7	19.2	19.3
Pudahuel Santiago	2006	Marzo	26.7	24.6	30.6	30.6	27.5	28.6	26.3	28.0	30.8	25.4	29.9	28.1	26.2	27.5	22.4	26.8	27.4	30.8	29.9	28.6	26.9	29.0	26.2	25.4	30.4	28.4	28.8	30.5	24.8	16.		

Quinta Normal	2000	Febrero	26.9	29.6	31.7	27.4	28.2	31.2	28.5	30.0	29.5	31.4	28.5	16.8	27.0	31.0	25.1	28.8	29.0	30.0	28.3	30.0	29.4	25.4	27.1	29.6	29.3	20.0	25.1	28.4	27.6			
Quinta Normal	2001	Febrero	30.6	31.2	31.4	32.2	33.5	33.0	32.6	32.2	30.0	30.8	31.6	30.6	31.4	32.0	32.4	31.0	30.4	28.4	28.2	27.2	30.0	28.8	26.2	31.5	31.8	29.4	30.0	29.4				
Quinta Normal	2002	Febrero	33.6	32.4	30.6	31.6	25.4	28.4	29.7	27.5	29.2	28.2	30.4	30.6	29.8	29.4	28.6	28.3	27.4	30.0	29.8	28.0	28.4	30.4	31.4	30.4	29.8	29.5	29.4	26.4				
Quinta Normal	2003	Febrero	33.4	31.8	31.6	31.6	32.0	30.4	30.8	30.6	30.6	29.4	28.0	32.2	32.4	25.6	30.0	30.3	30.6	27.4	26.0	25.8	30.6	30.6	34.0	31.0	28.5	27.5	28.0	28.5				
Quinta Normal	2004	Febrero	30.5	29.0	29.0	30.8	33.1	28.2	26.4	29.1	32.8	29.8	26.6	31.1	31.2	31.2	27.4	26.8	29.4	31.8	33.4	25.4	27.7	30.2	31.5	27.8	25.5	27.8	27.2	28.4	29.4			
Quinta Normal	2005	Febrero	32.1	29.9	27.9	31.0	27.5	28.8	29.0	34.7	34.4	31.1	22.3	23.4	28.1	29.3	30.8	30.4	24.9	31.2	28.9	31.4	30.8	31.7	32.3	30.6	35.9	32.3	25.4	22.0				
Quinta Normal	2006	Febrero	23.5	26.2	28.6	29.3	32.2	29.0	28.8	31.8	32.6	30.6	29.2	28.2	30.3	30.0	29.7	32.0	31.3	30.7	30.2	29.4	27.6	25.0	30.4	30.9	28.6	23.1	27.4	28.6				
Quinta Normal	2007	Febrero	32.7	33.0	31.7	29.5	22.8	25.4	29.0	30.2	31.2	31.4	30.4	29.0	30.1	28.1	24.7	26.4	24.3	27.3	27.7	28.0	23.7	27.7	30.3	32.8	33.2	31.0	26.7	27.5				
Quinta Normal	2008	Febrero	29.8	31.6	30.2	29.1	29.9	26.8	30.2	28.8	30.2	33.8	32.4	31.9	30.0	32.2	32.2	30.8	30.0	32.2	33.2	29.2	28.3	29.0	29.2	28.5	29.8	28.0	26.6	31.6	30.5			
Quinta Normal	2009	Febrero	31.4	29.9	30.9	31.6	29.9	30.5	31.8	31.2	31.6	31.2	33.9	34.6	32.8	33.4	31.6	29.7	31.6	33.0	30.5	28.9	25.3	30.5	31.2	31.7	28.8	29.8	28.7	26.9				
Quinta Normal	2010	Febrero	31.9	27.6	27.2	29.4	28.0	27.9	28.8	33.0	31.9	33.3	28.4	32.9	33.4	30.7	31.6	30.9	30.0	28.0	29.4	31.4	28.6	22.6	30.2	27.4	23.6	27.0	30.4	26.2				
Quinta Normal	2011	Febrero	33.7	31.0	31.7	32.8	32.4	30.8	30.2	30.0	28.4	23.8	24.8	24.6	31.6	34.6	27.4	25.6	31.0	31.6	28.0	26.2	27.4	29.4	28.0	26.8	28.8	30.9	30.8	31.2				
Quinta Normal	2000	Marzo	27.6	26.5	28.8	29.4	31.0	29.8	28.6	26.1	24.9	28.2	27.4	25.8	26.1	28.0	28.2	27.0	29.8	27.3	24.8	25.1	30.8	30.5	24.8	30.4	25.2	25.3	33.6	30.2	25.6	25.3	26.2	
Quinta Normal	2001	Marzo	30.2	30.4	31.2	30.6	30.4	31.8	29.4	29.4	25.0	27.8	30.6	27.2	30.2	30.4	28.8	29.0	28.8	30.4	29.4	25.6	15.6	17.2	22.0	27.0	27.6	24.4	27.8	30.4	28.2	28.0	24.8	
Quinta Normal	2002	Marzo	31.2	30.0	27.5	30.6	30.8	30.2	29.8	29.5	30.1	29.5	30.8	31.0	23.8	23.7	25.2	24.2	26.5	24.0	29.8	32.0	29.2	29.3	27.0	27.4	27.5	27.8	28.3	26.2	18.2	24.6	30.7	
Quinta Normal	2003	Marzo	29.0	30.4	31.2	25.9	20.3	31.7	25.4	27.5	28.6	29.4	27.4	27.0	28.2	24.8	27.4	32.3	28.8	25.6	20.3	29.6	28.4	25.4	24.8	28.7	29.6	27.6	24.1	26.2	26.2	26.5	27.7	
Quinta Normal	2004	Marzo	25.0	28.1	34.2	30.2	23.9	26.8	30.3	29.6	28.2	29.0	23.0	26.0	22.4	27.2	30.2	30.1	30.2	31.4	31.4	30.8	27.8	29.6	30.0	31.5	30.8	30.4	31.3	20.1	24.4	19.9	22.1	
Quinta Normal	2005	Marzo	25.9	32.7	33.5	30.6	31.9	24.0	17.4	25.7	31.4	31.4	22.6	21.8	31.5	29.1	24.8	26.8	25.9	29.2	30.2	27.4	28.4	29.5	33.1	30.5	29.0	21.1	26.0	25.7	25.1	19.9	19.8	
Quinta Normal	2006	Marzo	27.2	25.8	31.0	31.4	27.8	29.0	27.1	28.6	31.4	26.0	30.4	28.4	26.4	28.0	23.2	27.2	28.0	31.4	29.8	28.9	27.3	28.9	26.2	25.4	30.8	29.0	28.7	30.9	25.4	17.4	24.6	
Quinta Normal	2007	Marzo	26.8	29.4	28.3	32.2	32.3	27.2	23.2	26.9	28.2	30.5	31.7	31.7	29.9	27.6	24.4	30.4	33.7	30.0	27.1	27.9	26.5	23.5	29.7	29.8	26.4	19.7	18.5	20.2	14.9	24.4	29.1	
Quinta Normal	2008	Marzo	30.5	30.7	31.3	31.6	31.0	29.0	24.9	26.0	28.2	28.8	27.5	29.3	30.2	31.2	27.4	28.0	29.1	28.9	30.4	29.9	31.2	29.4	29.4	26.3	25.6	27.7	28.5	28.1	27.5	24.6	25.9	
Quinta Normal	2009	Marzo	28.4	29.4	18.2	29.5	32.7	33.1	32.4	31.4	31.8	25.0	29.0	32.0	31.7	32.0	34.0	28.2	32.3	29.6	24.0	28.8	29.6	28.9	29.0	28.1	27.9	29.4	27.9	29.8	28.0	29.9	31.2	
Quinta Normal	2010	Marzo	27.6	25.8	28.2	31.2	33.4	34.0	25.2	28.7	31.4	30.0	26.2	24.4	26.6	29.2	32.8	24.4	23.8	27.0	29.6	28.2	25.4	24.6	28.4	31.6	31.9	29.6	30.2	28.8	31.5	31.8	25.9	
Quinta Normal	2011	Marzo	32.4	30.5	32.2	30.0	25.9	22.7	29.4	29.6	29.0	28.0	26.2	23.6	28.6	19.0	16.6	27.7	28.4	31.9	29.0	29.2	28.0	27.6	26.2	27.8	22.6	25.4	24.2	28.9	30.0	30.1	28.6	
Eulogio Sánchez	2000	Febrero	26.8	28.4	30.8	28.6	28.4	31.6	29.2	30.6	30.6	31.2	28.8	16.6	27.6	31.0	25.4	28.8	28.4	30.2	28.4	30.3	29.8	26.6	28.8	29.6	29.0	19.4	24.6	28.0	28.0			
Eulogio Sánchez	2001	Febrero	30.4	31.0	31.8	32.2	33.0	33.2	32.6	32.4	29.9	30.6	31.0	31.2	31.4	31.8	32.8	31.9	31.4	29.2	28.8	27.8	30.2	28.8	27.2	31.6	31.8	29.4	29.8	28.6				
Eulogio Sánchez	2002	Febrero	33.8	32.0	31.4	31.8	26.9	28.4	30.9	26.8	29.2	29.0	30.0	30.9	29.6	29.8	28.4	29.2	28.0	30.0	29.4	28.6	28.2	30.4	32.0	31.6	30.2	30.2	29.8	26.0				
Eulogio Sánchez	2003	Febrero	32.8	31.2	30.5	31.4	32.0	29.4	30.8	30.6	30.4	28.8	28.2	31.8	32.0	26.4	29.6	30.2	30.8	27.2	25.4	26.0	30.2	30.2	33.8	32.0	29.4	26.8	27.8	28.2				
Eulogio Sánchez	2004	Febrero	30.8	29.4	28.6	30.4	33.4	29.4	27.2	29.4	32.6	30.8	27.2	31.0	31.2	31.0	27.6	26.6	29.6	30.4	33.4	25.6	27.2	29.8	31.0	28.2	26.6	26.6	27.0	28.2	29.4			
Eulogio Sánchez	2005	Febrero	31.6	30.0	29.0	31.0	28.4	29.0	29.4	34.6	35.4	33.0	23.8	23.4	27.6	29.0	30.6	30.5	25.6	31.4	28.4	31.4	31.2	31.0	32.0	30.2	35.1	32.6	26.2	22.8				
Eulogio Sánchez	2006	Febrero	24.2	27.0	29.6	29.8	31.8	29.4	28.6	31.2	32.6	30.8	29.6	28.2	31.2	30.6	29.0	31.4	31.0	30.4	30.4	29.8	29.0	24.8	30.0	31.0	28.6	22.8	26.6	28.2				
Eulogio Sánchez	2007	Febrero	32.9	30.7	28.0	30.8	24.4	27.0	30.0	29.6	31.2	30.2	27.0	29.6	26.8	28.0	25.6	16.2	23.9	26.7	27.0	23.2	23.6	27.6	30.2	32.4	30.2	26.6	27.4	25.2				
Eulogio Sánchez	2008	Febrero	29.6	31.0	30.6	28.4	29.7	26.0	29.6	28.2	29.4	33.6	32.4	31.8	30.6	31.8	31.8	30.8	30.2	32.0	32.2	28.8	28.2	29.0	29.0	28.4	29.6	28.8	26.0	31.8	30.2			
Eulogio Sánchez	2009	Febrero	30.2	28.2	31.0	31.0	29.4	31.4	28.4	30.6	30.4	31.4	34.2	32.8	30.6	31.8	29.0	30.2	32.4	30.2	28.2	29.2	25.0	30.2	31.0	28.2	29.6	28.8	27.5	21.0				
Eulogio Sánchez	2010	Febrero	31.0	28.0	26.0	22.0	27.0	26.0	27.0	31.0	31.0	32.0	27.0	31.0	32.0	29.0	30.0	29.0	30.0	26.0	28.0	30.0	28.0	15.0	29.0	27.0	22.0	26.0	22.0	27.2				
Eulogio Sánchez	2011	Febrero	32.7	29.8	31.0	32.0	32.5	29.4	30.4	29.4	27.6	23.0	24.0	23.8	30.4	33.4	28.4	25.0	30.5	31.3	27.1	26.5	26.4	28.5	27.0	26.8	28.0	30.2	30.8	30.3				
Eulogio Sánchez	2000	Marzo	28.0	27.8	28.4	28.7	31.2	30.4	28.6	27.2	25.4	27.8	27.4	25.6	26.0	28.4	28.2	27.8	30.0	28.6	25.2	24.6	30.4	28.8	24.8	30.5	25.6	25.4	23.0	30.8	26.4	25.4	26.4	
Eulogio Sánchez	2001	Marzo	29.4	30.4	31.4	30.6	29.8	30.8	29.6	29.4	25.2	27.8	31.2	26.8	30.0	30.6	29.6	29.2	29.0	29.8	29.6	25.2	14.6	16.0	21.5	26.6	28.2	28.0	31.2	29.0	28.0	23.8		
Eulogio Sánchez	2002	Marzo	31.0	30.4	27.8	31.2	31.0	30.0	29.6	29.2	30.2	29.8	31.0	31.2	25.3	22.8	25.4	22.4	27.2	23.5	29.0	31.2	28.6	31.2	27.6	27.2	27.2	27.4	28.2	26.4	18.0	24.0	30.6	
Eulogio Sánchez	2003	Marzo	29.0	30.2	31.2	26.4	19.2	32.8	26.2	28.4	28.6	30.2	27.6	26.8	28.4	25.0	27.6	32.8	29.4	26.6	21.4	29.4	29.3	25.4	24.4	28.2	28.8	27.2	24.4	25.5	26.4	26.6	27.4	
Eulogio Sánchez	2004	Marzo	23.0	27.6	34.4	31.2	24.2	26.6	29.6	29.6	29.2	30.2	23.4	27.4	25.2	27.0	30.2	30.0	29.2	31.2	31.0	30.4	28.4	29.6	30.2	31.6	31.0	30.0	31.4	19.6	25.4	18.8	20.4	
Eulogio Sánchez	2005	Marzo	25.4																															

La Serena	2000	Febrero	22.2	21.5	20.2	19.0	21.6	21.3	20.6	19.1	20.8	20.6	20.0	21.6	21.6	20.4	21.8	22.0	20.0	19.8	20.0	20.5	20.8	22.0	22.6	21.0	20.9	20.7	23.0	20.0	19.2			
La Serena	2001	Febrero	20.3	20.7	20.5	21.5	21.6	20.9	20.8	21.4	21.4	21.9	20.8	23.2	22.1	21.6	21.4	23.1	21.6	23.0	23.0	24.1	23.0	22.7	22.1	21.5	22.0	21.5	22.5	22.9				
La Serena	2002	Febrero	21.2	20.8	20.6	20.8	22.2	23.2	23.0	23.1	23.0	22.9	22.1	21.1	21.1	20.3	20.6	20.7	20.1	20.3	20.0	22.1	25.6	22.5	20.3	21.2	21.7	22.0	20.5	21.9				
La Serena	2003	Febrero	21.1	21.9	21.3	21.3	21.1	22.0	21.7	19.8	19.9	19.3	18.9	18.9	20.0	20.9	21.0	19.7	19.3	19.4	20.1	18.7	22.0	20.7	20.0	18.8	18.0	22.7	20.7	18.7				
La Serena	2004	Febrero	19.9	20.0	20.8	21.1	20.4	20.8	21.3	21.4	21.6	21.3	21.3	21.1	21.3	19.8	19.9	20.4	20.3	20.2	19.2	20.9	21.1	21.4	20.4	20.4	22.5	22.5	22.5	23.4	21.7			
La Serena	2005	Febrero	19.9	19.8	20.8	20.8	21.4	21.6	22.2	20.8	21.7	19.4	20.8	23.3	23.0	23.5	22.8	22.2	22.9	22.2	24.8	23.0	22.9	21.7	22.4	22.4	21.6	21.0	20.4	20.6				
La Serena	2006	Febrero	23.8	23.1	23.4	22.5	22.5	23.0	21.8	21.8	20.6	20.3	21.3	21.5	22.8	23.4	24.1	23.1	23.7	22.9	23.0	23.1	23.2	23.1	22.0	21.9	22.7	22.2	21.6	21.1				
La Serena	2007	Febrero	22.1	22.1	22.1	22.0	22.6	23.1	23.2	22.8	23.3	22.7	23.8	22.9	22.1	22.5	21.4	23.9	22.4	22.5	21.9	21.8	22.7	22.0	21.7	21.0	21.9	20.3	20.7	19.1				
La Serena	2008	Febrero	22.6	22.1	22.8	24.3	22.8	23.4	22.9	22.7	22.1	21.0	21.6	21.7	22.1	22.5	22.5	20.9	21.5	21.4	20.7	20.5	21.5	21.7	21.9	23.0	21.5	22.4	22.3	21.9	21.8			
La Serena	2009	Febrero	19.8	20.9	21.0	21.3	23.3	20.7	19.3	20.2	19.9	21.7	20.7	20.8	21.1	21.4	22.5	21.8	20.7	21.3	21.8	20.8	21.1	19.7	18.7	20.0	19.2	19.3	18.5	21.7				
La Serena	2010	Febrero	20.9	20.3	20.0	21.0	22.0	22.0	22.3	22.4	21.1	21.0	22.0	27.0	26.6	21.4	21.1	19.4	20.0	20.8	22.3	19.5	20.2	20.0	20.9	20.5	21.0	22.1	21.3	21.6				
La Serena	2011	Febrero	21.1	20.3	21.9	20.8	19.9	22.0	22.7	22.2	23.1	21.9	22.6	22.6	23.1	21.5	21.2	22.4	23.2	21.4	21.2	21.6	21.2	21.7	19.2	21.8	21.9	23.1	20.6	21.7				
La Serena	2000	Marzo	19.8	19.1	18.9	19.0	18.6	19.2	19.0	20.0	21.8	21.6	20.8	20.6	21.4	20.8	19.2	19.5	19.4	17.4	19.6	21.0	21.4	17.8	19.2	18.2	18.9	19.2	18.5	16.5	17.9	19.0	15.8	
La Serena	2001	Marzo	22.6	21.4	21.7	23.2	22.9	20.5	20.4	19.4	21.0	22.0	21.7	22.8	20.9	18.8	19.1	22.2	20.6	20.2	20.8	19.1	16.3	19.5	20.3	21.1	20.3	20.1	19.3	18.3	18.6	19.9	22.8	
La Serena	2002	Marzo	21.5	21.6	21.4	22.9	21.7	21.1	22.2	21.6	21.7	20.5	21.5	20.2	20.8	21.1	24.1	23.9	22.3	20.7	23.9	22.1	22.4	21.9	20.7	20.9	21.1	21.0	21.5	21.9	22.1	22.9	20.0	
La Serena	2003	Marzo	19.5	18.7	17.8	19.0	22.0	19.7	20.2	22.1	21.2	18.0	18.6	18.5	18.4	21.1	21.7	19.6	18.6	21.5	22.5	20.8	18.6	21.0	21.4	21.6	18.9	18.7	19.3	17.4	17.1	16.1	16.1	
La Serena	2004	Marzo	22.2	23.4	20.6	21.3	21.3	22.1	21.9	19.2	19.5	19.7	20.8	20.1	21.2	20.3	20.4	20.3	20.2	18.7	18.8	18.5	19.3	17.0	19.4	17.9	19.9	18.2	21.4	23.7	23.4	24.6	23.8	
La Serena	2005	Marzo	23.1	22.6	21.2	23.4	21.7	21.5	20.3	22.6	22.9	23.6	23.2	23.5	25.6	20.3	20.9	21.7	21.5	20.7	20.2	20.3	20.8	20.6	20.5	17.4	18.5	18.6	18.8	19.0	18.6	18.1	17.9	
La Serena	2006	Marzo	21.0	22.6	21.1	20.1	20.1	20.6	20.5	21.7	20.9	20.8	20.7	20.2	20.7	19.9	21.4	19.7	21.5	20.0	19.4	18.8	18.1	18.5	18.0	19.7	17.9	18.6	17.7	17.2	15.5	17.2	18.7	
La Serena	2007	Marzo	20.8	20.3	19.4	18.1	18.9	20.6	20.9	20.2	19.8	19.8	18.7	19.0	19.1	21.6	20.7	20.4	18.8	21.4	20.3	21.4	21.4	22.5	20.0	17.8	16.7	17.8	19.0	19.2	19.5	21.5	19.6	
La Serena	2008	Marzo	22.3	22.0	21.2	21.0	20.4	20.5	23.7	24.1	22.1	21.3	22.1	21.3	20.5	20.4	20.1	21.6	21.7	19.7	21.0	19.7	19.2	19.8	21.1	21.1	20.7	19.7	17.4	17.6	18.5	19.9	19.7	
La Serena	2009	Marzo	21.1	21.3	22.4	22.5	19.5	20.1	20.7	20.0	18.5	20.8	21.5	19.4	20.1	19.3	18.9	21.5	18.8	20.7	23.1	19.9	18.6	19.1	17.5	19.3	16.8	18.2	19.5	16.3	20.0	20.1	18.2	
La Serena	2010	Marzo	22.6	24.2	23.2	22.1	20.3	18.9	19.3	22.1	20.5	18.1	18.0	21.5	21.4	21.6	19.4	19.3	22.4	21.3	21.0	20.9	21.2	19.6	20.2	21.1	18.6	17.2	18.0	17.5	17.0	18.4	19.9	
La Serena	2011	Marzo	21.3	21.5	21.6	23.0	23.6	22.0	22.6	21.7	23.6	22.4	22.4	23.2	21.0	20.1	22.4	21.3	21.1	19.3	20.0	20.3	18.7	19.5	20.0	19.2	18.8	19.5	19.1	19.4	18.4	17.0	17.5	