



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CRECIMIENTO URBANO HISTÓRICO Y
PROYECTADO SOBRE EL COMPORTAMIENTO CLIMÁTICO EN CIUDADES:
Estudio de ciudades chilenas en el marco de Antropoceno urbano.

Memoria para optar al título profesional de Geógrafa
ALEJANDRA ANDREA TAPIA GUADALUPE
Profesor Guía: Dr. Pamela Smith

SANTIAGO – CHILE

2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres por su constante apoyo y contención en todos mis proyectos. Gracias por creer en mí, y recordarme mis capacidades y lo que puedo lograr, especialmente en los momentos en que yo lo olvidaba. También, a mi familia en general, gracias por los momentos de distracción y su incondicional apoyo.

A mis compañeros de generación, gracias por generar un ambiente agradable durante estos años y por el gran compañerismo demostrado. En especial, a la Cata, gracias por todos los trabajos que realizamos juntas, y por escucharme en mis momentos de ansiedad y estrés.

A mi perrita Mila, gracias por brindarme momentos de alegría y contención durante todo este proceso.

A mis amigas de infancia Anais y Vane, que vivieron conmigo este proceso, incluso al otro lado del mundo. Gracias por aguantar mis reuniones a las 5 de la mañana.

A la profe Pame, gracias por su disposición, paciencia y guía en este camino. Y a Felipe, gracias por su ayuda y orientación con el programa GEE.

Gracias!

A/e

RESUMEN

En el marco del Antropoceno, una era definida por el impacto humano en los sistemas naturales del planeta, las ciudades se destacan como áreas cruciales de estudio al evidenciar la magnitud de su influencia. El crecimiento urbano no solo redefine paisajes, sino que también modifica los patrones climáticos locales, afectando variables como temperaturas, precipitaciones y humedad del aire. Entre estos efectos, destaca el preocupante aumento de la temperatura superficial terrestre (TST), tema debatido en congresos internacionales. Si bien se han explorado diversas perspectivas para analizar este fenómeno, el enfoque más reciente es el estudio a través de las zonas climáticas locales (ZCL), una aproximación innovadora para comprender el clima urbano. A pesar de la destacada importancia de entender esta relación, la investigación en Sudamérica ha sido limitada, resaltando la urgencia de realizar más estudios. Por ende, este trabajo se enfoca en evaluar el impacto del crecimiento urbano en el comportamiento climático de ciudades chilenas, dentro del contexto del Antropoceno urbano, mediante la relación entre el cambio en las ZCL y la TST de ciudades de Chile. Se espera que esta investigación contribuya al entendimiento de la relación entre TST y ZCL, así como al debate sobre el Antropoceno urbano en la región.

Palabras clave: Antropoceno, Antropoceno urbano, temperatura superficial terrestre, zonas climáticas locales.

ABSTRACT

In the framework of the Anthropocene, an era defined by human impact on the planet's natural systems, cities stand out as crucial areas of study by showcasing the magnitude of this influence. Urban growth not only redefines landscapes but also alters local climate patterns, affecting variables such as temperature, precipitation, and air humidity. Among these effects, the worrying uncontrolled increase in land surface temperature (LST) is highlighted, a topic discussed in international congresses. While various perspectives have been explored to analyze this phenomenon, the most recent approach is the study through local climate zones (LCZ), an innovative approach to understanding urban climate. Despite the significant importance of understanding this relationship, research in South America has been limited, emphasizing the urgency of conducting more studies. Therefore, this work focuses on evaluating the impact of urban growth on the climatic behavior of Chilean cities, within the context of the urban Anthropocene, through the relationship between changes in LCZ and LST in cities of Chile. It is expected that this research will contribute to understanding the relationship between LST and LCZ, as well as to the debate on the urban Anthropocene in the region.

Keywords: Anthropocene, Urban Anthropocene, Land Surface Temperature, Local Climate Zones.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	9
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.3 ESTADO DEL ASUNTO.....	11
1.3.1. Antropoceno y cambio climático.....	11
1.3.2 Antropoceno Urbano.....	11
1.3.3 Antropoceno desde la Geografía	12
1.3.4 Impacto de la Urbanización en los Patrones Climáticos de las ciudades	12
1.3.5 Impacto en la temperatura superficial	13
1.3.6. Zonas climáticas locales y temperatura superficial.....	13
1.4 ÁREA DE ESTUDIO.....	14
1.4.1 Ciudades a nivel nacional.....	14
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos específicos	16
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	16
2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO N°1	16
2.1.1 Selección de ciudades	16
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO N°2	17
2.2.1 Identificación de áreas de cambio de Zonas Climáticas	17
2.2.2 Gráficos de temperatura superficial con MODIS y Landsat.....	18
2.2.3 Comparación de los resultados obtenidos con Landsat y MODIS.....	19
CAPÍTULO 3: RESULTADOS.....	19
3.1 SELECCIÓN DE CIUDADES	19
3.1.1 Crecimiento poblacional.....	19
3.1.2 Crecimiento urbano.....	20
3.1.3 Comportamiento climático.....	21
3.1.4 Ciudades seleccionadas	23
3.1.4.1 Caracterización de Rancagua	23
3.1.4.2 Caracterización de La Serena	25
3.2 CAMBIO DE ZONAS CLIMÁTICAS.....	27
3.2.1 Cambio Rural a Urbano	27
3.2.1.1 Áreas de Cambio y Áreas sin cambio en Rancagua.....	27

3.2.1.2 Áreas de Cambio y Áreas sin cambio en La Serena.....	29
3.2.2 Cambio Rural a Parcela con desarrollo urbano	31
3.2.2.1. Áreas de cambio y Áreas sin cambio en Rancagua.....	31
3.2.2.2 Áreas de cambio y Áreas sin cambio en La Serena.....	32
3.3 ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE PARA CADA ÁREA DE CAMBIO	33
3.3.1 Análisis estacional con Landsat 7.	33
3.3.1.1 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Urbano en Rancagua.....	33
3.3.1.2 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Urbano en La Serena	37
3.3.1.3 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Parcelas en Rancagua.....	41
3.3.1.4 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Parcelas en La Serena	43
3.3.2 Análisis Estacional con MODIS.....	44
3.3.2.1 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Urbano en Rancagua.....	44
3.3.2.2 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Urbano en La Serena	46
3.3.2.3 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Parcela en Rancagua.....	48
3.3.2.4 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Parcela en La Serena	50
3.4 COMPARACIÓN Y PROMEDIOS INTEGRADOS	52
3.4.1 Comparación de la media de verano e invierno antes y después del proceso de urbanización.	52
3.4.2 Comparación de Temperaturas en Puntos de Cambio Rural-Urbano en Días Específicos	53
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
4.1. DISCUSIÓN	54
4.2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de zonas climáticas locales y sus 17 clases estándar	14
--	----

Figura 2: Imágenes del punto 3 de cambio rural-urbano de Rancagua, antes, durante, y después del proceso de urbanización.....	34
Figura 3: Imágenes del punto 4 de cambio rural-urbano de Rancagua, antes, durante, y después del proceso de urbanización.....	35
Figura 4: Imágenes del punto 9 de cambio rural-urbano de Rancagua, antes, durante, y después del proceso de urbanización.....	36
Figura 5: Imágenes del punto 10 de cambio rural-urbano de Rancagua, antes, durante, y después del proceso de urbanización.....	37
Figura 6: Imágenes del punto 1 de cambio rural-urbano de La Serena, antes, durante, y después del proceso de urbanización.....	38
Figura 7: Imágenes del punto 3 de cambio rural-urbano de La Serena, antes, durante, y después del proceso de urbanización.....	39
Figura 8: Imágenes del punto 7 de cambio rural-urbano de La Serena, antes, durante, y después del proceso de urbanización.....	41

ÍNDICE DE CARTOGRAFÍAS

Cartografía 1: Distribución de las 20 ciudades de Chile analizadas en este estudio. ..	15
Cartografía 2: Clasificación de zonas climáticas en la ciudad de Rancagua para el año 2022.	25
Cartografía 3: Clasificación de zonas climáticas en la ciudad de La Serena para el año 2022.	27
Cartografía 4: Áreas de cambio de zonas climáticas locales, de rural-urbano, entre los años 2002 a 2022 en la ciudad de Rancagua.	28
Cartografía 5: Áreas de cambio de zonas climáticas locales, de rural-urbano, entre los años 2002 a 2022 en la ciudad de La Serena.	29
Cartografía 6: Áreas de cambio de zonas climáticas locales, de rural a parcelas con desarrollo urbano, entre los años 2002 a 2022, en la ciudad de Rancagua.	31
Cartografía 7: Áreas de cambio de zonas climáticas locales, de rural a parcelas con desarrollo urbano, entre los años 2002 a 2022, en la ciudad de La Serena.	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Evolución y proyección al año 2035 del crecimiento de la población de distintas ciudades de Chile.	19
Tabla 2: Crecimiento urbano histórico y proyectado al 2035 de distintas ciudades de Chile.	20
Tabla 3: Comportamiento climático presente y futuro de distintas ciudades de Chile.	22
Tabla 4: Periodo y tipo de cambio de clasificación de zonas climáticas de los puntos de transición rural a urbana, en la ciudad de Rancagua.	28

Tabla 5: Periodo y tipo de cambio de clasificación de zonas climáticas de los puntos de transición rural a urbana, en la ciudad de La Serena.	30
Tabla 6: Periodo y tipo de cambio de clasificación de zonas climáticas de los puntos de transición rural a parcela, en la ciudad de Rancagua.	32
Tabla 7: Periodo y tipo de cambio de clasificación de zonas climáticas de los puntos de transición rural a parcela, en la ciudad de Rancagua.	33
Tabla 8: Comparación de la Temperatura Media de Verano Antes y Después del Proceso de Urbanización en La Serena y Rancagua Usando Landsat 7 y MODIS	52
Tabla 9: Comparación de la Temperatura Media de Invierno Antes y Después del Proceso de Urbanización en La Serena y Rancagua Usando Landsat 7 y MODIS	53

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 3 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7	34
Gráfico 2: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 4 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.	35
Gráfico 3: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 9 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.	36
Gráfico 4: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 10 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.	37
Gráfico 5: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.	38
Gráfico 6: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 3 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7	39
Gráfico 7: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 7 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.	40
Gráfico 8: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.	41
Gráfico 9: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.	41
Gráfico 10: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.	42
Gráfico 11: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.	42
Gráfico 12: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.	43
Gráfico 12: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.	43

Gráfico 14: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.....	44
Gráfico 15: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.....	44
Gráfico 16: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 3 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.	45
Gráfico 17: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 4 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.	45
Gráfico 18: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 9 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.	45
Gráfico 19: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 10 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.	46
Gráfico 20: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.....	47
Gráfico 21: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 3 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.....	47
Gráfico 22: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 7 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.....	47
Gráfico 23: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.....	48
Gráfico 24: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.....	49
Gráfico 25: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.....	49
Gráfico 26: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.....	49
Gráfico 27: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.....	50
Gráfico 28: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.....	51
Gráfico 29: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.....	51
Gráfico 30: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.....	51

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En el marco del Antropoceno, una era definida por la intensa influencia humana sobre los sistemas naturales del planeta, las ciudades emergen como áreas críticas de estudio para comprender esta transformación. La urbanización, fenómeno que ha alcanzado niveles sin precedentes en el siglo XXI, no solo redefine los paisajes, sino que también altera significativamente los patrones climáticos locales, afectando variables clave como la temperatura, las precipitaciones y la humedad del aire (Sarricolea et al., 2008). Entre estos efectos, el incremento descontrolado de la temperatura superficial terrestre (TST) se destaca como un tema de gran preocupación global, ampliamente discutido en foros y congresos internacionales (Yu et al., 2024).

El crecimiento urbano, especialmente en las últimas décadas, ha sido uno de los principales factores que ha contribuido al aumento de la TST. Este fenómeno es particularmente observable en las denominadas islas de calor urbano (ICU), donde las temperaturas pueden ser significativamente más altas que en las zonas rurales circundantes. Comprender cómo el uso del suelo y las características urbanas específicas influyen en la TST es crucial para desarrollar estrategias eficaces de mitigación y adaptación al cambio climático.

El enfoque más reciente y prometedor para analizar estos fenómenos es el estudio a través de las Zonas Climáticas Locales (ZCL). Esta metodología innovadora permite una clasificación detallada de las áreas urbanas en función de características como la densidad de construcción, la altura de los edificios, y la cobertura del suelo, proporcionando un marco teórico robusto para entender las variaciones climáticas dentro de las ciudades. Sin embargo, a pesar de su potencial, la investigación sobre las ZCL y su relación con la TST ha sido limitada en Sudamérica (Smith et al, 2023) lo que subraya la necesidad urgente de estudios contextualizados en esta región.

Chile, un país con un alto grado de urbanización y diversidad climática, ofrece un contexto ideal para investigar estos fenómenos. Este estudio, que es parte del Fondecyt Regular 1220688, "¿Qué nos depara el Antropoceno Urbano?: Aportes de los modelos espaciales predictivos al sistema urbano chileno", se centra en evaluar el impacto del crecimiento urbano histórico (2002-2022) y proyectado (2035) sobre el comportamiento climático de ciudades chilenas representativas, en el marco del Antropoceno urbano. La investigación se basa en el análisis de la relación entre los cambios en las ZCL y la TST de estas ciudades, seleccionadas por su comportamiento climático actual y proyectado, así como por su crecimiento urbano.

Se espera que esta investigación no solo contribuya a una mejor comprensión de la relación entre la TST y las ZCL, sino también al debate más amplio sobre el Antropoceno urbano en la región. Al proporcionar datos y análisis contextualizados, este estudio pretende ofrecer una base sólida para el desarrollo de políticas urbanas y ambientales más eficaces, que puedan abordar los desafíos climáticos actuales y futuros en las ciudades chilenas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La era actual, denominada Antropoceno, está caracterizada por la profunda interacción entre la actividad humana y los sistemas naturales. Si bien la Tierra ha atravesado múltiples cambios climáticos a lo largo de su historia, desde períodos glaciales hasta interglaciares, los cambios recientes se distinguen por su rapidez e intensidad (Uriarte, 2003). Esta situación es consecuencia directa del aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, derivado de las actividades humanas.

En el contexto del Antropoceno, las ciudades adquieren un papel preponderante. Las concentraciones urbanas son epicentros del consumo de recursos y de las emisiones de gases contaminantes. Las ciudades son manifestaciones tangibles de la huella ecológica de la humanidad y se consideran símbolos distintivos de la era antropogénica, llegando a ser descritas como el “fenómeno ecológico que define al siglo XXI” (While y Whitehead, 2013; Duque y Montoya, 2021).

El acelerado proceso de urbanización no solo transforma el paisaje urbano, sino que también modifica significativamente los patrones climáticos locales (Sarricolea et al., 2008). Este fenómeno se refleja en el incremento de la temperatura superficial terrestre (LST), cuyo aumento descontrolado es una preocupación global (Yu et al., 2024). Para abordar eficazmente el cambio climático y sus efectos en áreas urbanas, es esencial entender cómo el uso del suelo impacta en la temperatura. En este sentido, la clasificación de Zonas Climáticas Locales ofrece un marco teórico esencial para analizar cómo las características específicas de cada entorno urbano afectan los patrones térmicos (Su et al., 2024). Estudios recientes han establecido una relación significativa entre las Zonas Climáticas Locales (ZCL) y la temperatura superficial terrestre (TST). En Beijing, por ejemplo, las ZCL densamente construidas mostraron las temperaturas más altas, mientras que en Shanghai, los cuerpos de agua ejercieron un efecto notable de enfriamiento (Su et al., 2024). Además, investigaciones realizadas en Chile por Smith et al. (2023) revelaron que las ZCL también desempeñan un papel crucial en la regulación de la temperatura superficial en las ciudades chilenas. Específicamente, las áreas clasificadas como ZCL de baja altura compacta (ZCL 3) generalmente exhibieron temperaturas superficiales más elevadas.

A pesar del creciente reconocimiento de estos problemas, la investigación en Sudamérica ha sido limitada (Smith et al., 2023), realizándose hasta la fecha la mayor parte de los estudios empíricos en ciudades chinas (Aslam y Ahmad, 2022). Subrayando la urgente necesidad de estudios contextualizados a nivel local para enfrentar los desafíos climáticos en las ciudades de la región. Es crucial ampliar la investigación y recopilar datos relevantes para abordar estas cuestiones en el contexto del Antropoceno urbano, especialmente en países con altos niveles de urbanización como Chile.

En consecuencia, resulta imprescindible indagar sobre esta problemática. Partiendo de su análisis surgen los siguientes interrogantes: ¿Cómo ha influido el crecimiento urbano histórico (2002-2022) a través de los cambios de zonas climáticas en la temperatura superficial local? ¿Cómo influirá el crecimiento proyectado en el comportamiento

climático de ciudades representativas de Chile dentro del marco del Antropoceno urbano?

Para dar respuesta a estas preguntas que delimitan el problema de investigación, se elabora un estudio, se propone evaluar el efecto del crecimiento urbano histórico (2002-2022) y proyectado (2035) sobre el comportamiento climático de las ciudades de Rancagua y La Serena, el marco del Antropoceno urbano. Este análisis se realizará investigando la relación entre los cambios en las zonas climáticas locales de estas ciudades durante los años 2002-2022, seleccionadas según su comportamiento climático actual y futuro y su crecimiento urbano, y su influencia en la temperatura superficial. Se espera que este estudio contribuya al campo emergente que explora la relación entre la temperatura superficial y las zonas climáticas, así como a la discusión sobre el Antropoceno urbano en la región.

1.3 ESTADO DEL ASUNTO

En la próxima sección se expondrán los estudios más relevantes relacionados con los conceptos que orientarán esta investigación.

1.3.1. Antropoceno y cambio climático

A lo largo de la historia de la Tierra han ocurrido cambios severos y abruptos en el clima, dando lugar a intervalos de períodos fríos y de glaciación, así como a períodos cálidos conocidos como interglaciares (Uriarte, 2003). Estos cambios son cíclicos y se deben a causas naturales, por lo que se espera que el clima en la tierra sea cambiante (Urriarte, 2003). Sin embargo, los cambios en el clima ocurridos después del último periodo de glaciación y en particular en los últimos siglos han sido distintos a los registrados anteriormente, más vertiginosos y profundos (Zamora et al., 2016). Esto se debe principalmente al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por actividades humanas, lo cual ha llevado a un calentamiento global acelerado.

Estos cambios en el clima han dado lugar al surgimiento del concepto del Antropoceno, el cual sugiere que el Holoceno ha sido reemplazado por una nueva era, en donde las actividades antrópicas han alterado de manera drástica e irreversible los patrones naturales y sistemas de la tierra, y que debido a estas razones se considera como una posible nueva época geológica (Brown, 2014; Zamora et al., 2016). Y aunque este término se empezó a usar informalmente en los años 80, no fue hasta el año 2000 que se propuso oficialmente, por Paul J. Crutzen y Eugene F. Stoermer en el boletín del Programa Internacional Geosfera-Biosfera. Dos años después Crutzen presentó su hipótesis al respecto, definiendo que esta nueva era comenzó con la Revolución industrial a finales del siglo XVIII, y que continuará siendo la fuerza ambiental predominante durante miles de años más (Crutzen, 2002; Trischer, 2017).

1.3.2 Antropoceno Urbano

En esta nueva era denominada Antropoceno, las ciudades desempeñan un papel crucial como áreas de estudio, debido a su condición como centros de concentración humana, caracterizados por un elevado consumo de recursos naturales y energía, así como por altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (Prugh et al, 2016). Además, se prevé que la urbanización continúe en aumento, según las proyecciones de las Naciones Unidas para el año 2050, alcanzando aproximadamente el 66% de la población mundial, en comparación con el 54% actual (Hanberry, 2022).

Estas urbes representan de manera evidente la magnitud de la influencia humana y permiten la comprensión del cambio ecológico global que experimentamos. Esto ha llevado a hablar de un "cambio global urbano" (Montes y Gutiérrez, 2014), en donde la ciudad se considera la principal responsable del daño ambiental y el emblema de esta nueva era antropogénica (Duque y Montoya, 2021).

Es por esto que, durante las últimas décadas, las ciudades y los procesos de urbanización han acaparado la atención de científicos, gobiernos y activistas, llegando a considerarse que 'son el fenómeno ecológico que define al siglo XXI' (While y Whitehead; Duque y Montoya, 2021). Este reconocimiento marca un cambio significativo, ya que tomó más de un siglo de investigación establecer una conexión directa entre las actividades urbanas y el cambio ambiental (Duarte et al, 2006).

1.3.3 Antropoceno desde la Geografía

El análisis del Antropoceno desde la perspectiva de la Geografía ha cobrado una importancia crucial en el contexto académico y científico, pues esta disciplina se enfoca en comprender la relación entre la actividad humana y el entorno natural. Autores como Sánchez (2021) destacan la relevancia de investigar esta nueva era desde la geografía, resaltando cómo los geógrafos físicos han explorado el impacto del crecimiento urbano en los patrones climáticos de las ciudades. En este sentido, Brazel (2017) subraya la importancia de entender cómo la urbanización afecta el clima urbano, señalando que este conocimiento es fundamental para comprender las complejidades de los procesos físicos, sociales, ecológicos y políticos que influyen en el clima a diferentes escalas temporales y espaciales.

1.3.4 Impacto de la Urbanización en los Patrones Climáticos de las ciudades

En los últimos años, este crecimiento significativo de la urbanización ha provocado cambios sustanciales en la cobertura y los usos del suelo, caracterizándose por un aumento notable de las áreas urbanas a expensas de la disminución de las zonas verdes y la biodiversidad (Fujimori et al., 2018). Este fenómeno no sólo redefine el paisaje urbano, sino que también genera un impacto significativo en los patrones climáticos a través del aumento de las temperaturas, disminución de la humedad del aire y velocidad del viento, entre otros efectos (Sarricolea et al., 2008).

Este incremento en la urbanización ha influenciado tanto la configuración como la cantidad de precipitación en las ciudades, principalmente a través de las denominadas islas de calor urbano (ICU) (Steensen et al., 2022). Así mismo, bajo el escenario de

expansión urbana proyectado, las áreas urbanizadas experimentan un marcado aumento en la precipitación estival promedio. Este incremento se atribuye principalmente a un aumento en la intensidad y duración de los eventos de lluvia (Bukovsky et al., 2021).

Además, el crecimiento urbano afecta directamente las temperaturas, especialmente en áreas con pronósticos de rápida urbanización, donde se registra un notable aumento tanto en la temperatura media como en la máxima durante el verano (Bourscheidt, 2017).

1.3.5 Impacto en la temperatura superficial

Entre estos impactos en los patrones climáticos se destaca el incremento descontrolado de la temperatura superficial terrestre, un fenómeno tan significativo que llevó a los gobiernos participantes en la Cumbre de París a consensuar la necesidad de limitar estrictamente el aumento de la temperatura de la superficie terrestre a menos de 2 °C desde la era preindustrial, para garantizar un futuro seguro (Yu et al., 2024).

También, estudios recientes han demostrado que los cambios en el uso del suelo pueden influir considerablemente en la temperatura, con impactos comparables a las emisiones de gases de efecto invernadero (Bourscheidt, 2017).

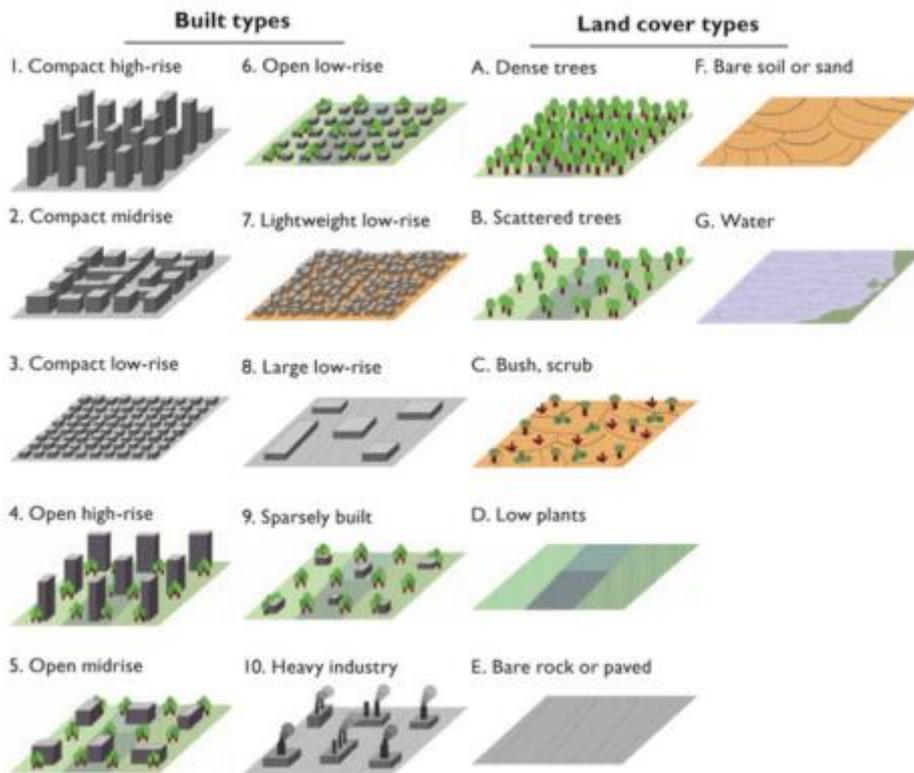
Este punto es de gran importancia debido al papel fundamental que juega la Temperatura Superficial Terrestre (LST) en el equilibrio energético de la Tierra y su aplicación en una variedad de contextos para evaluar las condiciones de la superficie terrestre (Tran et al, 2017; Luna y Medina, 2020). El análisis de esta variable revela valiosa información sobre las propiedades físicas de la superficie y el clima, que son cruciales para numerosos procesos ambientales. Por lo tanto, varias instituciones están comenzando a reconocer su importancia, lo que ha generado un considerable interés en el desarrollo y perfeccionamiento de técnicas de medición de la LST utilizando tecnología de teledetección (Idirs et al., 2023).

1.3.6. Zonas climáticas locales y temperatura superficial

Abordando más a fondo el impacto de la urbanización en el clima urbano, es esencial considerar cómo el constante crecimiento de las ciudades ha generado la necesidad de desarrollar métodos estandarizados para estudiar el clima en entornos urbanos. En este contexto nace la clasificación de Zonas Climáticas Locales (ZCL), propuesta por Stewart y Oke (2012), la cual describe cómo el clima local de una ciudad es único debido a las características específicas de su entorno construido y natural (Zwolska et al, 2024). Este enfoque ofrece un marco de clasificación para áreas urbanas, que se distinguen según criterios que influyen en la temperatura como la densidad de construcción, la altura de los edificios, cobertura y flujo de calor antropogénico (Stewart y Oke, 2013). Las ZCL son fundamentales para comprender el clima de las ciudades, ya que permiten identificar patrones climáticos comunes dentro de entornos urbanos diversos (Smith et al, 2023).

Como se puede observar en la siguiente imagen (Figura 1) las zonas climáticas locales dividen las áreas urbanas en diez tipos de construidos y siete de cobertura terrestre, facilitando de esta manera un análisis detallado del entorno térmico urbano entre diferentes ciudades (Stewart et al., 2013), y también proporcionando una base sólida para comprender las relaciones entre la composición urbana y la temperatura de la superficie terrestre (TST), aspecto crucial para el desarrollo de estrategias de planificación urbana y adaptación al cambio climático. Estas zonas son esenciales para identificar patrones climáticos comunes dentro de diversos entornos urbanos (Su et al, 2024).

Figura 1: Clasificación de zonas climáticas locales y sus 17 clases estándar



Fuente: Stewart and Oke (2012).

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

Durante el desarrollo de este estudio, se emplearon dos escalas de análisis distintas: una a nivel nacional y otra a nivel local específico de ciudad. En la primera escala, se evaluaron múltiples ciudades a lo largo de Chile. Posteriormente, en base a estos análisis a nivel nacional, se seleccionaron dos ciudades específicas para un análisis más detallado a nivel local, estas 2 ciudades corresponden a los resultados de este estudio, por lo que, sus caracterizaciones serán detalladas más adelante en este trabajo.

1.4.1 Ciudades a nivel nacional

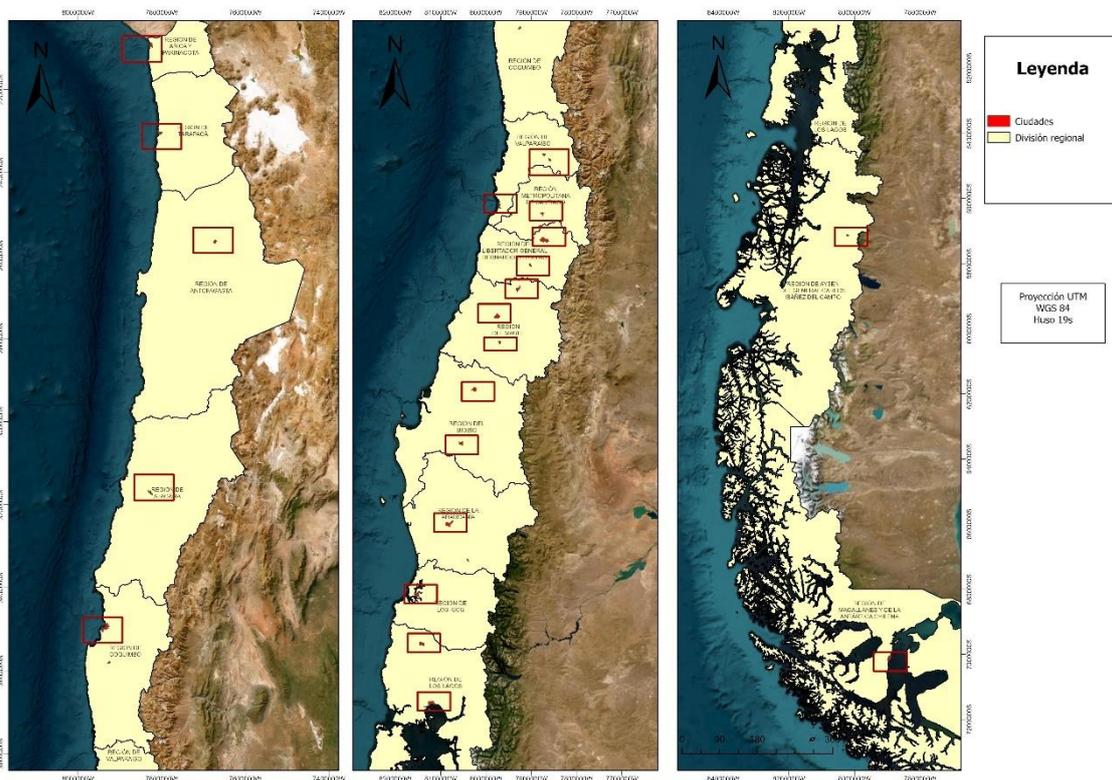
Las ciudades elegidas son núcleos urbanos en crecimiento o ciudades intermedias, debido a su potencial de desarrollo infraestructural y demográfico. Estas ciudades son capitales regionales o forman parte de una conurbación. Se excluyeron ciudades más

grandes como Santiago, Valparaíso y Concepción debido a la complejidad que su tamaño considerable añadiría al análisis.

Estas ciudades son Antofagasta, Arica, Buin, Calama, Chillán - Chillán Viejo, Colina, Copiapó, Coyhaique, Curicó, Iquique - Alto Hospicio, La Serena - Coquimbo, Linares, Los Andes - Calle Larga, Los Ángeles, Melipilla, Osorno, Ovalle, Puerto Montt, Punta Arenas, Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios, San Antonio - Cartagena - Las Cruces – Sto. Domingo, San Felipe, San Fernando, Talca - Culenar, Temuco - Padre Las Casas - Cajón, y Valdivia.

En la cartografía 1 se muestra la ubicación de estas ciudades en el territorio nacional. De las 20 ciudades estudiadas, 6 se encuentran cercanas al mar, mientras que las restantes están situadas en el valle, o cercanas a la frontera con Argentina, como es el caso de Coyhaique.

Cartografía 1: Distribución de las 20 ciudades de Chile analizadas en este estudio.



Fuente: Elaboración propia

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el efecto del crecimiento urbano histórico (2002-2022) y proyectado (2035) sobre el comportamiento climático de ciudades chilenas representativas en el marco del Antropoceno urbano.

1.3.2 Objetivos específicos

- 1) Seleccionar ciudades chilenas representativas a partir del crecimiento urbano y comportamiento climático promedio actual y futuro.
- 2) Evaluar la relación entre el comportamiento climático y el crecimiento urbano a escala zonal.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO N°1

Para llevar a cabo este objetivo, se identificaron dos indicadores clave para analizar las ciudades de Chile: el crecimiento poblacional y urbano, así como el comportamiento climático, actual y futuro.

A continuación, se especifica la metodología utilizada en base a los indicadores

2.1.1 Selección de ciudades

a) En base al crecimiento urbano

Para analizar el crecimiento urbano, se recopilaron datos de los usos de suelo urbano de los años 2003 y 2017 desde la página web del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). Estos datos estaban originalmente en formato shapefile, por lo que se descargaron y procesaron en el programa ArcGIS Pro. Utilizando la herramienta "*Table to Excel*", se extrajo la información y se convirtió al formato Excel. Además, se emplearon los resultados de un modelo de simulación de uso de suelo urbano para el año 2035, también en formato shapefile, que se convirtieron al formato Excel mediante la misma herramienta.

Posteriormente, se procedió a organizar estos datos en una tabla, excluyendo las ciudades que no disponían de información para todos los años mencionados. Este proceso resultó en un total de 25 ciudades incluidas en el análisis.

b) En base al crecimiento poblacional

En cuanto a los datos de población, se utilizó la información proporcionada por Henríquez et al., (2020) en su estudio titulado "Ciudades" para ARClím. Estos datos comprenden la población de varias ciudades del país para los años 2002 y 2017, los cuales se obtuvieron a partir de los respectivos censos. Además, se empleó un modelo de proyección de población hasta el año 2065 del mismo autor. Todos estos datos se trabajaron en Excel

c) En base al comportamiento climático

Por otro lado, para evaluar el comportamiento climático, se emplearon datos sobre la temperatura media, temperatura media máxima anual, y duración de los días cálidos, presentes y futuros. En el caso de la temperatura media, se utilizaron datos históricos de temperatura máxima de la página de ARCLim, abarcando el período de 1980-2010 y las proyecciones futuras de 2035-2065. Estos datos se descargaron en formato xlsx y se exportaron a Excel.

Por otro lado, los datos sobre el índice de confort térmico, temperatura media y la duración de los días cálidos se obtuvieron de un informe realizado por Aliaga en (2021) para el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Estos datos se presentaban en formato Excel, por lo que se realizaron ajustes en este formato y se organizaron en una tabla de Excel.

b). Análisis y selección de las ciudades representativas

Se construyeron tablas para todas estas variantes junto con sus respectivos datos. A partir de estas tablas, se identificaron las ciudades que presentaban las tasas de cambio más altas, y las que presentaban las tasas más bajas. Luego, se tomaron en consideración las ciudades que se repetían con mayor frecuencia en estos conjuntos de datos. Finalmente, a las 2 ciudades seleccionadas se le realizó una caracterización de su clima, lo que ha sido su desarrollo urbano, y sus zonas climáticas al año 2022.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO N°2

2.2.1 Identificación de áreas de cambio de Zonas Climáticas

Después de la elección de las ciudades se procedió a utilizar las capas de zonas climáticas locales de estas, correspondientes al año 2020, elaboradas en el marco del Fondecyt de Iniciación 11180080 (2018 – 2022). Estas capas fueron trabajadas en Google Earth, donde se emplearon imágenes satelitales desde el año 2002 en adelante para identificar los puntos de cambio más significativos, así como las áreas de transición ubicadas en el mismo sector. Estas transiciones abarcaron desde zonas rurales hacia áreas urbanas, y desde zonas rurales hacia parcelas con desarrollo urbano. Se considero como urbano todas aquellas clasificaciones como *“Built types”*, como rural las clasificaciones *“Land cover types”*, y como parcela con desarrollo urbano las clasificaciones *“Sparsely built”*.

El criterio utilizado para la selección de estas áreas de transición se basó en un enfoque específico. Se tomaron en cuenta aquellos lugares que habían experimentado un cambio de Zona Climática, siempre y cuando hubieran permanecido clasificados bajo una misma categoría climática durante un mínimo de 6 años antes de la transición y otros 6 años después de ella, esto con el objetivo de tener un periodo mayor de análisis.

Es importante destacar que este análisis se llevó a cabo en un período de tiempo que abarcó desde el año 2002 hasta el 2022.

Finalmente, una vez identificado las áreas de cambio de zona climática de rural a urbano y de rural a parcelas, que cumplían con el criterio mencionado, fueron llevadas al programa ArcGIS Pro para su conversión a formato shapefile.

2.3 Identificación de áreas sin cambio

Para realizar la comparación con las áreas de cambio de zonas climáticas y verificar el aumento de la temperatura, se seleccionaron áreas específicas que mantuvieron su clasificación como zonas naturales durante todo el período de estudio. Posteriormente, se identificó para cada una de las áreas de cambio, tanto de rural-urbana como de rural-parcela, una zona sin cambio correspondiente, la cual era la más cercana en proximidad. Cada par de áreas de cambio y sin cambio más cercana se almacenó en un shapefile individual, resultando en un total de 21 shapefiles

2.2.2 Gráficos de temperatura superficial con MODIS y Landsat.

La estimación de la temperatura superficial de las áreas seleccionadas se realizó mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), que alberga una amplia colección de imágenes de diversos sensores, como Landsat, Sentinel y MODIS. Se optó por utilizar MODIS, y Landsat 7 para obtener las temperaturas superficiales.

Se llevaron a la plataforma GEE los shapefiles de áreas de cambio junto a las áreas sin cambio más cercanas, para lograr hacer la comparación.

La plataforma GEE utiliza principalmente dos lenguajes de programación: JavaScript y Python (Perrilla y Mas, 2020). Por lo tanto, se emplearon dos códigos para generar gráficos de temperatura superficial con MODIS y Landsat 7. Se siguió la guía "*Time Series in Image Regions*" disponible en el sitio web de Google Earth Engine, adaptando las especificaciones según el sensor utilizado. Además, dado que GEE trabaja en grados Kelvin, se agregó un código para convertir la temperatura a Celsius. También se incluyó un código para la cobertura de nubes, de acuerdo con las especificaciones de cada satélite. Ambos códigos calculaban la temperatura media tanto en verano como en invierno.

Para ambos códigos, se consideraron los siguientes aspectos:

- **Filtro de Fecha:** Se utilizó la función `ee.Filter.date()` para seleccionar las imágenes de temperatura dentro del período de interés, que abarca desde el 1 de enero de 2002 hasta el 31 de diciembre de 2022.
- **Medias anuales por estaciones del Año:** Para calcular las medias de temperatura anuales para cada estación del año (verano e invierno), se empleó la función `ee.Date.fromYMD()` para definir los rangos de fechas correspondientes a cada estación, y la función `mean()` para obtener la temperatura media de las imágenes de LST para cada estación del año
- **Filtro de Nubes:** Se aplicó un filtro de cobertura de nubes menor al 20% utilizando la función `ee.Filter.Metadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 20)`.

La única diferencia significativa entre los códigos de MODIS y Landsat fue la selección de bandas:

- **Selección de Bandas para Landsat 7:** Se eligió la banda de temperatura de brillo (brightness temperature) de las imágenes de Landsat 7. Esta banda, denominada B6_VCID_2, representa la temperatura radiativa medida por el sensor remoto en la parte superior de la atmósfera.

Finalmente, los gráficos generados para cada shapefile fueron extraídos en formato jpg.

2.2.3 Comparación de los resultados obtenidos con Landsat y MODIS

Se descargó información sobre la temperatura media de verano e invierno de ciertas áreas tanto de MODIS como de Landsat en formato CSV desde GEE. Estos datos se exportaron a Excel, donde se calcularon los promedios de temperatura antes y después del proceso de urbanización para cada sensor. Posteriormente, se construyó una tabla comparativa con los resultados obtenidos. Además, se seleccionaron fechas específicas para comparar las temperaturas registradas por MODIS y Landsat 7.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1 SELECCIÓN DE CIUDADES

3.1.1 Crecimiento poblacional

El crecimiento poblacional, según se evidencia en la tabla (Tabla 1), muestra que la ciudad con el mayor aumento durante el periodo 2002-2017 es La Serena-Coquimbo, con un incremento de 103.197 habitantes, seguida por Iquique-Alto Hospicio con 78.482, Antofagasta con 63.262, Rancagua con 50.739 y Talca con 46.625.

Por el contrario, las ciudades que presentan el menor crecimiento durante el periodo 2002-2017 son en primer lugar Constitución con un aumento de sólo 108 habitantes, le sigue San Carlos, con 3.170, San Felipe con 4.742, Coyhaique con 4.817, y Limache-Olmue con 5.671.

En cuanto a las proyecciones de crecimiento para el año 2065, las ciudades que presentan el aumento más significativo son; La Serena-Coquimbo, con un aumento proyectado de 258.127 habitantes, seguida por Rancagua con 222.460, Talca con 149.828, San Felipe con 142.723 y Melipilla con 114.945.

En contraparte, las ciudades que tienen la menor proyección para el 2065 son Punta Arenas con 12.258, Osorno con 16.828, Los Ángeles con 17.043, Constitución con 18.174, y Ovalle con 24.748.

Tabla 1: Evolución y proyección al año 2035 del crecimiento de la población de distintas ciudades de Chile.

Ciudades	2002	2017	Crecimiento	2035	proyección de crecimiento
Antofagasta	285.255	348.517	63.262	460.882	112.365
Arica	175.441	202.131	26.690	231.549	29.418
Buín	40.091	65.607	25.516	100.163	34.556
Calama	126.135	157.575	31.440	255.683	98.108
Chillán - Chillán Viejo	146.701	164.270	17.569	196.135	31.865
Colina	58.769	88.858	30.089	266.399	177.541
Copiapó	125.983	150.804	24.821	196.788	45.984
Coyhaique	44.850	49.667	4.817	95.751	46.084
Curicó	93.447	125.275	31.828	214.167	88.892
Iquique - Alto Hospicio	214.586	293.068	78.482	357.561	64.493
La Serena - Coquimbo	296.253	399.450	103.197	657.577	258.127
Linares	65.133	73.602	8.469	134.453	60.851
Los Andes - Calle Larga	60.093	69.041	8.948	149.416	80.375
Los Ángeles	117.972	143.023	25.051	160.066	17.043
Melipilla	53.522	72.212	18.690	187.157	114.945
Osorno	132.245	147.666	15.421	164.494	16.828
Ovalle	66.405	75.864	9.459	100.612	24.748
Puerto Montt	153.118	169.736	16.618	218.104	48.368
Punta Arenas	116.005	123.403	7.398	135.661	12.258
Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios	239.290	290.029	50.739	512.490	222.461
San Antonio - Cartagena - Las Cruces - Sto. Domingo	106.101	118.668	12.567	155.391	36.723
San Felipe	59.801	64.543	4.742	207.266	142.723
San Fernando	49.519	58.367	8.848	113.788	55.421
Talca - Culenar	189.722	236.347	46.625	386.175	149.828
Temuco - Padre Las Casas - Cajón	260.783	277.529	16.746	318.179	40.650
Valdivia	122.750	150.048	27.298	224.555	74.507

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Henríquez et al, (2020).

3.1.2 Crecimiento urbano

En cuanto al crecimiento urbano, según se evidencia en la tabla 2, durante el periodo 2002-2017, las ciudades que experimentaron un mayor aumento fueron lideradas por La Serena-Coquimbo, con un incremento total de 7.840 hectáreas, seguida por Rancagua con 4.373, Puerto Montt con 2.802, Quillota con 2.618 y Osorno con 2.420 hectáreas.

Por otro lado, las ciudades que presentaron el menor aumento de área urbana durante el periodo 2002-2017, fueron: Los Andes con 108 hectáreas, le sigue Melipilla con 184, Ovalle con 325, Copiapó con 772, y San Felipe con 884.

En relación al modelo de simulación urbana proyectado hasta el año 2035, las ciudades que presentan un mayor aumento en su área urbana son las siguientes: en primer lugar, Copiapó, con un incremento de 15.334 hectáreas, alcanzando así un área urbana de 17.662; seguida por La Serena-Coquimbo, con un aumento de 11.941 hectáreas, llegando a un total de 21.195; luego Rancagua-Machalí, con un aumento de 10.986 hectáreas y un área resultante de 18.885; posteriormente, Quillota, con un incremento de 6.667 hectáreas y un área final de 10.482; y finalmente, San Felipe, con un aumento de 6.627 hectáreas, quedando con 7.698 en total.

Por el contrario, las ciudades con la menor proyección de crecimiento son Iquique-Alto Hospicio con un aumento de solo 461 hectáreas, le sigue Puerto Montt con 887 hectáreas, Coyhaique con 960, Linares con 1.276 y Osorno con 2197.

Tabla 2: Crecimiento urbano histórico y proyectado al 2035 de distintas ciudades de Chile.

Ciudades	2003	2017	Crecimiento	2035	proyección de crecimiento
Antofagasta	3318,19	4353,22	1035	6569,80	2217
Arica	1991,16	2906,50	915	6819,32	3913
Buín	610,68	2356,80	1746	6085,34	3729
Calama	1525,39	2408,10	883	5515,47	3107
Chillán + Chillán viejo	3145,41	4064,70	919	8598,61	4534
Coyhaique	1232,81	2552,30	1319	3512,50	960
Copiapó	1557,14	2328,90	772	17662,56	15334
Curicó	2085,14	3868,84	1784	7998,39	4130
Iquique-Alto Hospicio	2735,33	3727,20	992	4188,03	461
La Serena-Coquimbo	1405,31	9254,07	7849	21195,29	11941
Linares	785,50	2592,00	1807	3867,69	1276
Los Andes	1150,28	1331,70	181	7762,35	6431
Los Ángeles	268,76	1305,20	1036	5075,99	3771
Melipilla	818,62	1002,36	184	3647,38	2645
Osorno	1767,80	4188,10	2420	6385,45	2197
Ovalle	956,23	1281,09	325	89491,83	88211
Puerto Montt	2878,98	5681,39	2802	6568,66	887
Punta Arenas	4859,18	7241,72	2383	11207,42	3966
Quillota	1187,45	3805,90	2618	10482,44	6677
Rancagua-Macahalí	3526,99	7899,60	4373	18885,47	10986
San Antonio-Llolleo	1993,75	2932,70	939	7056,48	4124
San Felipe	226,49	1070,80	844	7698,29	6627
Talca	3819,85	6132,24	2312	11773,91	5642
Valdivia	2151,1	4322,53	2171	7824,17	3502

Fuente: Elaboración propia en base a datos de MINVU (2003 y 2017) y Henríquez et al, (2020).

3.1.3 Comportamiento climático

Como se observa en la Tabla 3, actualmente, las ciudades con la mayor cantidad de episodios cálidos son Arica, con 3,23 días, Iquique-Alto Hospicio con 3 días, Calama con 2,97, Antofagasta con 2,81, y Copiapó con 2,62. En el futuro, se espera que Antofagasta sea la más afectada en este aspecto, con un aumento del 43,42, quedando con una temperatura proyectada de 46,23; le sigue Iquique-Alto Hospicio con un aumento del 43,27, alcanzando 46,27, Calama con 38,63, quedando con 41,6, Arica con 38,15, alcanzando 41,38, y Copiapó con 30,35, quedando con 32,97.

Por otro lado, las ciudades que actualmente presentan la menor cantidad de episodios cálidos son San Antonio, con 1,67 días, seguida por Quilpué con 1,68, Melipilla con 1,7, Talca y Quillota con 1,77. En cuanto a las proyecciones futuras, las ciudades que presentarán la menor cantidad de episodios cálidos son: Punta Arenas con 6,76, seguida por Osorno con 6,97, Valdivia con 7,05, Coyhaique con 7,08, y Puerto Montt con 7,13. Respecto a la variación, las ciudades que experimentarán el menor aumento de episodios son: Coyhaique con 4,52, Punta Arenas con 4,82, Osorno con 5,07, Valdivia con 5,13, y Temuco con 5,58.

En cuanto a la temperatura media, actualmente, la ciudad con la temperatura más alta es Arica, con 21,61°C, seguida por Buín con 21°C, Talca con 20,9°C, San Fernando con 20,87, y Los Andes con 20,81°C. En relación con las proyecciones futuras de la temperatura media, se espera que Arica presente la mayor temperatura, con 23,1°C, seguida por Buín con 22,21°C, Talca con 22,14°C, Los Andes con 22,1°C, y San Fernando con 21,99°C. Sin embargo, los mayores aumentos de temperatura se prevén en Calama, con un aumento de 1,6°C pasando de 15,97°C a 17,56°C, seguida por Arica

con un aumento de 1,49°C, Iquique-Alto Hospicio con 1,46°C, Talca con 1,44°C y Coyhaique con 1,44°C.

En contraste, las ciudades con las temperaturas medias más bajas actualmente son Punta Arenas con 10,44°C, seguida por Coyhaique con 13,1°C, Puerto Montt con 14,47°C, Calama con 15,97°C, y Valdivia con 16,22°C. En cuanto a las proyecciones de las temperaturas medias, las ciudades que presentarán las menores temperaturas son: Punta Arenas con 11,52°C, Coyhaique con 14,54°C, Puerto Montt con 15,51°C, Valdivia con 17,47°C, y Calama con 17,56°C. En términos de cambio entre las condiciones actuales y las proyecciones futuras, las ciudades que presentan la menor variación de temperaturas medias son: Quilpué con una proyección de aumento de solo 0,94°C, seguida por San Antonio con 0,99°C, Quillota con 1,01°C, La Serena-Coquimbo con 1,02°C, y Puerto Montt con 1,05°C.

En el caso del promedio de la temperatura máxima diaria, la ciudad que actualmente presenta la temperatura más alta es Buin con 23,51°C, seguida por San Felipe con 22,58°C, Rancagua-Machalí con 22,33°C, Talca con 22,24°C, y Melipilla con 21,66°C. Por el contrario, las ciudades que presentan las temperaturas más bajas son Punta Arenas con 7,5°C, Los Andes con 9,31°C, San Fernando con 13,45°C, Puerto Montt con 14,24°C, y Valdivia con 16,7°C.

Con respecto a las proyecciones futuras, se observan notables variaciones en las tasas de cambio entre las temperaturas máximas diarias actuales y las proyectadas para el futuro en diversas ciudades. Aquellas que presentarán las mayores temperaturas son Buin con 25,13°C, San Felipe con 24,24°C, Rancagua-Machalí con 23,9°C, Talca con 23,52°C, y Melipilla con 23,2°C. Por otro lado, las ciudades que experimentarán la mayor variación de temperatura son: Calama con un aumento de 2,46°C, Antofagasta con 2,18°C, Copiapó con 2°C, Arica con 1,8°C y Los Andes con 1,75°C, siendo Calama la que presenta el mayor aumento en su temperatura máxima futura, pasando de 16,416°C a 19,2977°C.

En contraste, las ciudades que presentarán las temperaturas máximas diarias más bajas en el futuro son Punta Arenas con 8,78°C, seguida por Los Andes con 11,9°C, Coyhaique con 11,91°C, San Fernando con 15,11°C, y Puerto Montt con 15,3°C. Por otro lado, las que presentarán las menores variaciones son Puerto Montt, con un aumento de solo 1,07°C, seguida por Osorno con 1,19°C, Chillán con 1,26°C, Talca con 1,27°C, y Los Ángeles con 1,3°C.

Tabla 3: Comportamiento climático presente y futuro de distintas ciudades de Chile

Ciudades	duración episodios cálidos			temperatura media			temperatura media máxima anual		
	Presente	Futuro	Diferencia	presente	Futura	Diferencia	presente	futura	Diferencia
Antofagasta	2,81	46,23	43,42	19,27	20,69	1,43	19,40	21,59	2,18
Arica	3,23	41,38	38,15	21,61	23,10	1,49	19,42	21,22	1,80
Buín	2,02	11,88	9,87	21,00	22,21	1,21	23,51	25,13	1,61
Calama	2,97	41,60	38,63	15,97	17,56	1,60	16,84	19,30	2,46
Chillán + Chillán viejo	1,85	8,70	6,85	19,79	21,08	1,29	21,39	22,65	1,26
Coyhaique	2,57	7,08	4,52	13,10	14,54	1,44	10,48	11,91	1,45
Copiapó	2,62	32,97	30,35	20,00	21,17	1,17	16,98	18,98	2,00
La Serena Coquimbo	1,97	18,07	16,10	19,14	20,15	1,02	20,23	21,62	1,40
Curicó	1,82	9,62	7,80	20,62	21,69	1,07	16,87	18,43	1,53
Iquique-altohospicio	3,00	46,27	43,27	18,75	20,22	1,46	20,08	21,84	1,53
Linares	1,87	9,39	7,53	19,87	21,09	1,22	18,07	19,55	1,46
Los Andes	2,17	14,00	11,83	20,81	22,01	1,20	9,31	11,09	1,75
Los Ángeles	1,87	7,80	5,93	18,90	20,27	1,37	20,22	21,55	1,30
Melipilla	1,70	10,9	9,20	19,87	21,06	1,19	21,66	23,20	1,56
Osorno	1,90	6,97	5,07	16,46	17,88	1,42	17,40	18,60	1,19
Ovalle	1,98	15,55	13,57	19,71	20,77	1,06	21,36	22,76	1,40
Puerto Montt	2,03	7,13	5,10	14,47	15,51	1,05	14,24	15,30	1,07
Punta Arenas	1,94	6,76	4,82	10,44	11,52	1,07	7,50	8,78	1,27
Quillota	1,77	11,82	10,05	19,27	20,28	1,01	21,46	22,92	1,46
Rancagua_Machali	1,97	11,18	9,21	20,28	21,47	1,19	22,33	23,90	1,53
San Antonio-Lollecó	1,67	10,94	9,27	17,59	18,58	0,99	20,82	22,24	1,44
San Felipe	2,08	13,50	11,42	20,19	21,35	1,15	22,58	24,24	1,70
San Fernando	1,90	10,32	8,42	20,87	21,99	1,12	13,45	15,11	1,62
Talca	1,77	9,63	7,87	20,90	22,14	1,24	22,24	23,52	1,27
Temuco + PLC	1,87	7,45	5,58	16,94	18,38	1,44	18,74	20,07	1,33
Valdivia	1,92	7,05	5,13	16,22	17,47	1,25	16,70	17,88	1,18

Fuente: Elaboración propia en base a datos de ARCLim (s.f) y de Aliaga (2021).

3.1.4 Ciudades seleccionadas

En base a todo el análisis anterior, se han elegido Rancagua y La Serena como las ciudades más idóneas para este estudio. Esta decisión se basa en su notable crecimiento poblacional y urbano a lo largo de los años de estudio, así como en los pronósticos de importantes aumentos según los modelos de simulación. Esto posiciona a ambas ciudades como centros de interés de relevancia nacional.

Rancagua, por un lado, destaca por su notable crecimiento poblacional y urbano, y aunque no está entre las ciudades con los cambios más significativos en términos de variables climáticas, presenta temperaturas medias y máximas actuales y proyectadas considerablemente altas. Su ubicación, al no ser zona costera, facilita la utilización de imágenes satelitales para la observación y el análisis de los cambios en el entorno urbano y natural a lo largo del tiempo.

La Serena, por otro lado, se encuentra en los primeros lugares de crecimiento urbano y poblacional histórico y proyectado, lo que la hace relevante para este análisis. Aunque es parte de una conurbación con Coquimbo, se decidió trabajar solo con la ciudad de La Serena debido a la extensión que tiene esta conurbación, lo que permite un enfoque más específico y manejable para el estudio.

3.1.4.1 Caracterización de Rancagua

La ciudad de Rancagua se encuentra emplazada en el Valle del Cachapoal, en la Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins, Provincia de Cachapoal. De acuerdo con el censo del año 2017 cuenta con una población de 241.774, y tiene una superficie de 260.3 km² (bcn, 2024).

La cuenca se distingue por su clima mediterráneo, que se define como templado cálido con una estación seca prolongada. Esto se traduce en estaciones del año bien

marcadas, con veranos generalmente calurosos y secos, e inviernos lluviosos y frescos (Sancharico, 2012).

Actualmente Rancagua es el centro urbano más importante de su región, y presenta uno de los mayores crecimientos urbanos, y proyección de crecimiento, de todo el país (Henríquez et al., 2020). A lo largo del tiempo, este conglomerado urbano ha experimentado un crecimiento gradual, en gran parte impulsado por el desarrollo de la minería y la agricultura en la zona (Irizarri, 2020). En sus inicios, Rancagua ocupaba el centro histórico, expandiéndose primero hacia el sur y luego hacia el norponiente. A partir de la década de los 2000, se ha observado una aceleración en el crecimiento urbano de Rancagua, con una tendencia marcada hacia el norte y el suroriente (Sarricolea et al., 2008). Esta aceleración se refleja especialmente en el aumento de superficie, con los mayores incrementos registrados entre 2011 y 2017 (Irizarri, 2020). Según (Arenas et al., 2009), el crecimiento de este sistema ha sido mayormente horizontal, con la proliferación de condominios entre las áreas urbanas de Rancagua y Machalí. Esto ha transformado la tipología de urbanización en las últimas décadas, generando nuevas morfologías alrededor del área urbana histórica (Irizarri, 2020).

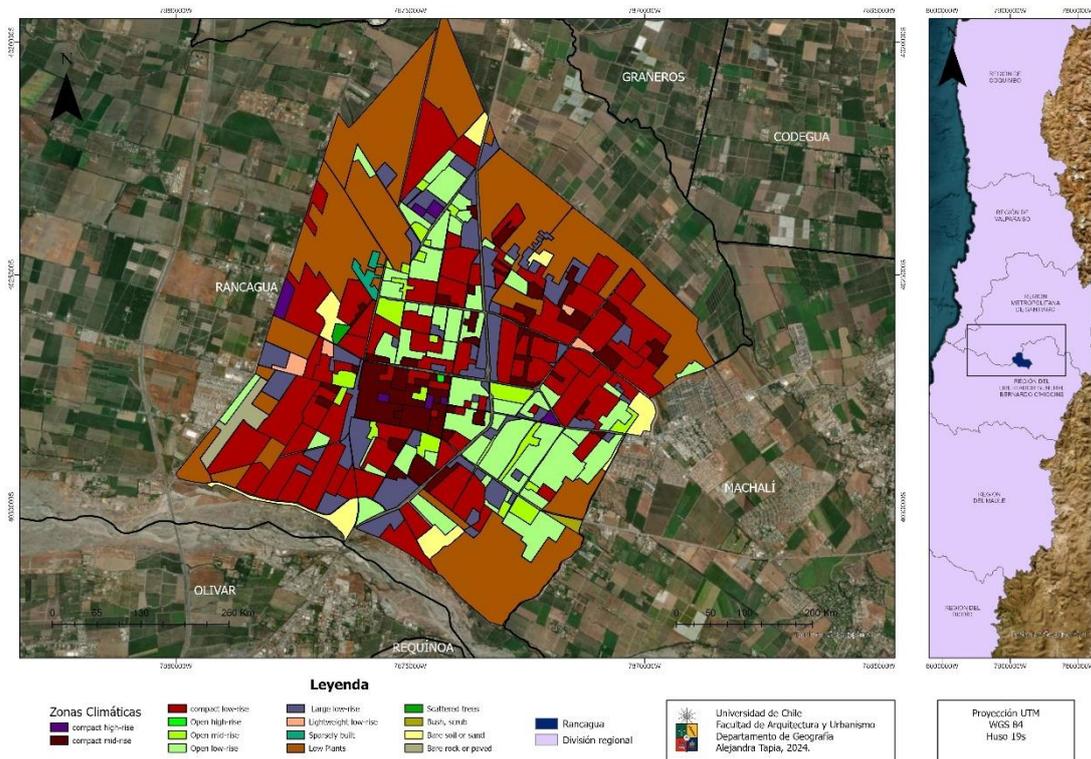
En relación con sus zonas climáticas, como se observa en la cartografía 2, la ciudad de Rancagua presenta un total de 14 clases de zonas climáticas, 9 series construidas "*build type*" y 5 series naturales "*cover type*". La clasificación predominante es la de tipo "*low plants*", caracterizada por ser un paisaje sin rasgos distintivos de hierba o plantas/cultivos herbáceos, con pocos o ningún árbol, y donde su principal función es de pastizales naturales, agricultura o parque urbano (Stewart y Oke, 2012). En el caso de Rancagua, la mayor parte de esta clase corresponde a plantaciones de viñedos, y hortalizas, en menor medida. La segunda clase con más áreas en la ciudad es "*compact low rise*", la cual se define como una mezcla densa de edificaciones de baja altura (1-3 pisos), con pocos o ningún árbol, y con cubierta terrestre principalmente pavimentada (Stewart y Oke, 2012), en este caso corresponde en su mayoría a viviendas. La tercera clase que más se repite es "*Open low rise*", la cual se define como una disposición abierta de edificaciones de baja altura (1-3 pisos), donde hay abundancia de cobertura de suelo permeable (Stewart y Oke, 2012). En este caso también correspondiente principalmente a viviendas.

Por otro lado, entre las clasificaciones menos comunes se incluyen el tipo "*Open high-rise*", la cual se define como disposición abierta de edificios altos de varias decenas de pisos, con abundancia de cobertura de suelo permeable (plantas bajas, árboles dispersos) (Stewart y Oke, 2012), en este caso solo hay un sector en la ciudad que está bajo esta clasificación, que corresponde a 2 edificios que se ubican en el centro de la ciudad. Le sigue la clasificación "*Scattered trees*", que describe un paisaje ligeramente arbolado de árboles caducifolios y/o perennes, con una cobertura de suelo principalmente permeable (plantas bajas). La función de la zona es bosque natural, cultivo de árboles o parque urbano (Stewart y Oke, 2012), en este caso corresponde a un cementerio. También está el tipo "*Bush, scrub*" que se define como disposición abierta de arbustos, matorrales y árboles bajos y leñosos, cuya cobertura de suelo es principalmente permeable (suelo desnudo o arena). La función de la zona es matorral natural o agricultura (Stewart y Oke, 2012), que en este caso corresponde a un sector de terreno baldío sin ningún uso. Finalmente, está la clasificación "*Sparsely built*", la cual

se define como disposición dispersa de edificaciones pequeñas o medianas en un entorno natural, con abundancia de cobertura de suelo permeable (plantas bajas, árboles dispersos (Stewart y Oke, 2012), que en este caso corresponden a algunas parcelas con desarrollo urbano.

Por último, las clasificaciones que no se encuentran en la ciudad son 3, en el caso de las series construidas “*Built types*” es la clase “*Heavy industry*” que se define como estructuras industriales de baja y mediana altura (torres, tanques, chimeneas) (Stewart y Oke, 2012). En el caso de las series naturales “*Land cover types*” los tipos que no se encuentran son “*Dense trees*” que corresponden a un paisaje densamente arbolado de árboles caducifolios y/o perennes que se identifican como bosque natural, cultivo de árboles o parque urbano (Stewart y Oke, 2012), y el tipo “*Water*”, que correspondiente a grandes cuerpos de agua abiertos como mares y lagos, o cuerpos de agua más pequeños como ríos, embalses y lagunas (Stewart y Oke, 2012).

Cartografía 2: Clasificación de zonas climáticas en la ciudad de Rancagua para el año 2022.



Fuente: Elaboración propia

3.1.4.2 Caracterización de La Serena

La ciudad de La Serena se encuentra en la región de Coquimbo, en el norte de Chile, y forma parte de la provincia de Elqui. Según datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) de 2017, La Serena cuenta con una población de 221.054 habitantes, y la superficie de la ciudad es de 1892.8 km² (bcn, 2024).

Esta área se encuentra en una zona climática de transición, situada entre el desierto al norte y la región templada mediterránea al sur. Por lo tanto, su clima es semiárido con lluvias invernales y una influencia costera, de acuerdo con Sarricolea et al. (2017), basándose en la clasificación climática de Köppen-Geiger.

La Serena fue fundada en 1544 y, tras ser destruida en 1549, se reconstruyó en una ubicación definitiva con un diseño defensivo. Las amenazas marítimas y una planicie costera inundada mantuvieron el crecimiento urbano alejado de la costa. Con el tiempo, la ciudad se estableció en terrazas elevadas frente a la bahía de Coquimbo, desarrollando una fuerte relación con la actividad agrícola y minera (Orellana et al., 2016).

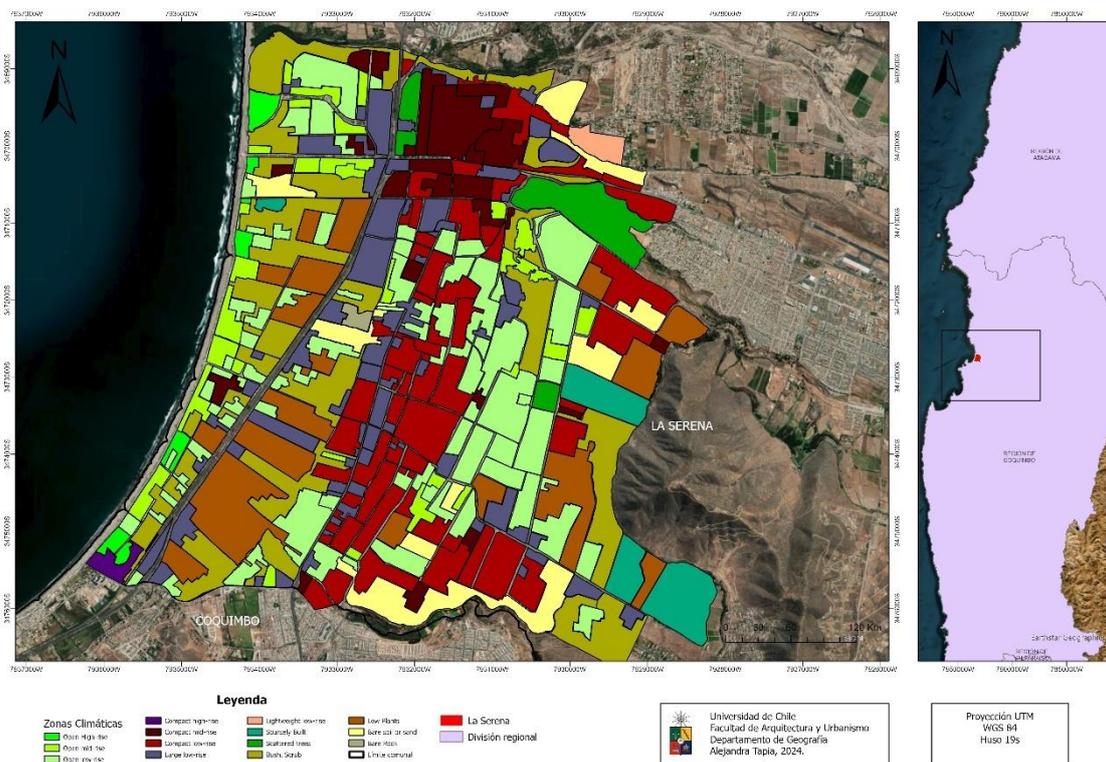
Posteriormente, desde la década de los 50, La Serena experimentó un crecimiento notable con tasas explosivas de aumento poblacional (Veliz, 1990). Este periodo marcó el inicio de una transformación urbana significativa, donde la ciudad expandió su suelo hacia la costa y el puerto de Coquimbo, dando lugar al proceso de conurbación entre ambas ciudades (Torrent, 2004). Este fenómeno se caracterizó por un mercado liberalizado de suelo y vivienda, influenciado por la transformación capitalista y la consolidación de un modelo neoliberal urbano. Este enfoque generó un crecimiento fragmentado de la conurbación (Aguirre et al., 2018).

En relación con sus zonas climáticas, como se observa en la cartografía 3, La Serena presenta un total de 14 clases de zonas climáticas, 9 series construidas "*build type*" y 5 series naturales "*cover type*", al igual que Rancagua. A modo general, no se observa un tipo de clasificación dominante, sin embargo, las clases que presentan una mayor extensión son, por un lado, "*Brush, Scrub*", que como ya se describió corresponde a un área abierta de arbustos, matorrales y árboles bajos y leñosos (Stewart y Oke, 2012). También la clase "*Low plants*", descrita como paisaje sin rasgos distintivos de hierba o plantas/cultivos herbáceos. Pocos o ningún árbol (Stewart y Oke, 2012). Y, por último, la clase "*compact low rise*" la cual se define como mezcla densa de edificaciones de baja altura (1-3 pisos) (Stewart y Oke, 2012).

Por otro lado, entre las clasificaciones menos comunes se incluyen el tipo "*Lightweight low-rise*" que se describe como una densa mezcla de edificios de una sola planta (Stewart y Oke, 2012). Le sigue la clase "*Bare Rock*", que se define como un paisaje sin rasgos distintivos de roca o superficie pavimentada (Stewart y Oke, 2012). Y finalmente la clase "*compact high rise*" que se describe como una mezcla densa de edificios altos de decenas de pisos (Stewart y Oke, 2012).

Por último, al igual que en Rancagua, las clasificaciones que no se encuentran en la ciudad son 3, en el caso de las "*Built types*" es la clase "*Heavy industry*" que se define como estructuras industriales de baja y mediana altura (torres, tanques, chimeneas). Pocos o ningún árbol (Stewart y Oke, 2012). En el caso de las "*Land cover types*" los tipos que no se encuentran son "*Dense trees*" que corresponden a un paisaje densamente arbolado de árboles caducifolios y/o perennes, y se identifican como bosque natural, cultivo de árboles o parque urbano (Stewart y Oke, 2012), y el tipo "*Water*" correspondiente a grandes cuerpos de agua abiertos como mares y lagos, o cuerpos de agua más pequeños como ríos, embalses y lagunas (Stewart y Oke, 2012).

Cartografía 3: Clasificación de zonas climáticas en la ciudad de La Serena para el año 2022.



Fuente: Elaboración propia

3.2 CAMBIO DE ZONAS CLIMÁTICAS

3.2.1 Cambio Rural a Urbano

Se identificaron 20 áreas de cambio de zonas climáticas de cobertura natural a cobertura urbana, 10 en Rancagua y 10 en La Serena. Sin embargo, se registraron distintos tipos de zonas como resultado final en cada ciudad. En ambas ciudades se observaron áreas sin cambio, es decir, que mantuvieron su cobertura natural, aunque este tipo de cobertura varió entre las dos ciudades.

A continuación, se detallan más los resultados para cada ciudad.

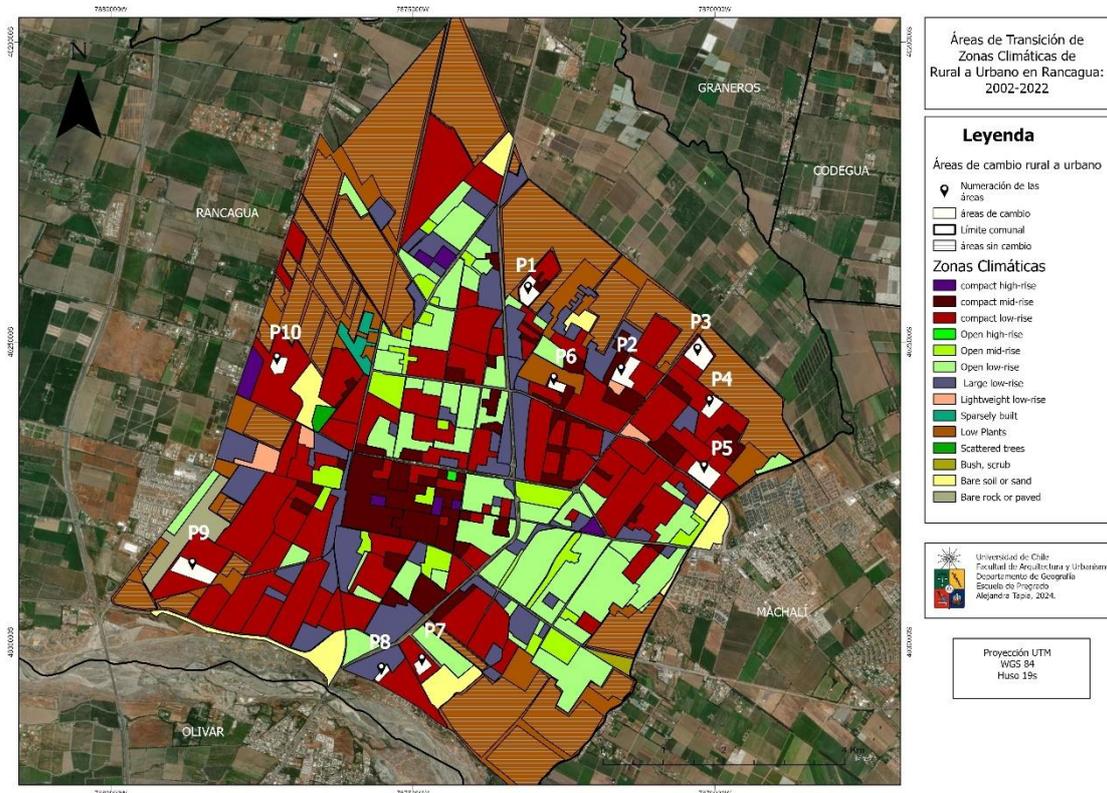
3.2.1.1 Áreas de Cambio y Áreas sin cambio en Rancagua

Como se detalla en la cartografía 4, se identificaron 20 áreas que permanecieron sin cambios durante el período de estudio, todas clasificadas como “*low plants*”. La mayoría de estas áreas se ubican en las periferias de la ciudad, con una concentración en la zona norte de Rancagua. El uso predominante de estos sectores es como terrenos de cultivo, especialmente para viñedos y hortalizas, aunque también se observa la presencia de terrenos baldíos, pero en una mínima proporción, generalmente cerca de zonas climáticas clasificadas como “*compact low rise*”.

Debido a que este es un sector agrícola, no se lograron identificar sectores naturales que no hayan tenido alguna intervención humana.

Adicionalmente, se identificaron un total de 10 áreas de cambio de zona climática, de rural a urbano, en la ciudad de Rancagua. La mayoría de estos puntos se encuentran en las afueras de la ciudad, concentrándose en la zona noreste de la ciudad.

Cartografía 4: Áreas de cambio de zonas climáticas locales, de rural-urbano, entre los años 2002 a 2022 en la ciudad de Rancagua.



Fuente: Elaboración propia

Todas estas áreas de cambio tenían una clasificación de “Low plants” y, como se observa en la Tabla 4, la mayoría pasó a una clasificación de “compact low rise”. En relación con los períodos de cambio, el período más común es de 2011 a 2013. El área con el período más temprano de urbanización es el punto 6, comenzando a urbanizarse en 2010, mientras que el área con el período más tardío es el punto 5, comenzando a urbanizarse en 2015.

Tabla 4: Periodo y tipo de cambio de clasificación de zonas climáticas de los puntos de transición rural a urbana, en la ciudad de Rancagua.

Punto	zona climática antigua	periodo de cambio	zona climática nueva
1	low plants	2013-2014	compact high rise
2	low plants	2015-2016	compact midrise
3	low plants	2011-2013	compact low rise
4	low plants	2011-2013	compact low rise
5	low plants	2013-2014	compact low rise
6	low plants	2010-2011	compact midrise
7	low plants	2013-2014	compact low rise
8	low plants	2012-2013	compact low rise
9	low plants	2011-2013	compact low rise
10	low plants	2011-2013	compact low rise

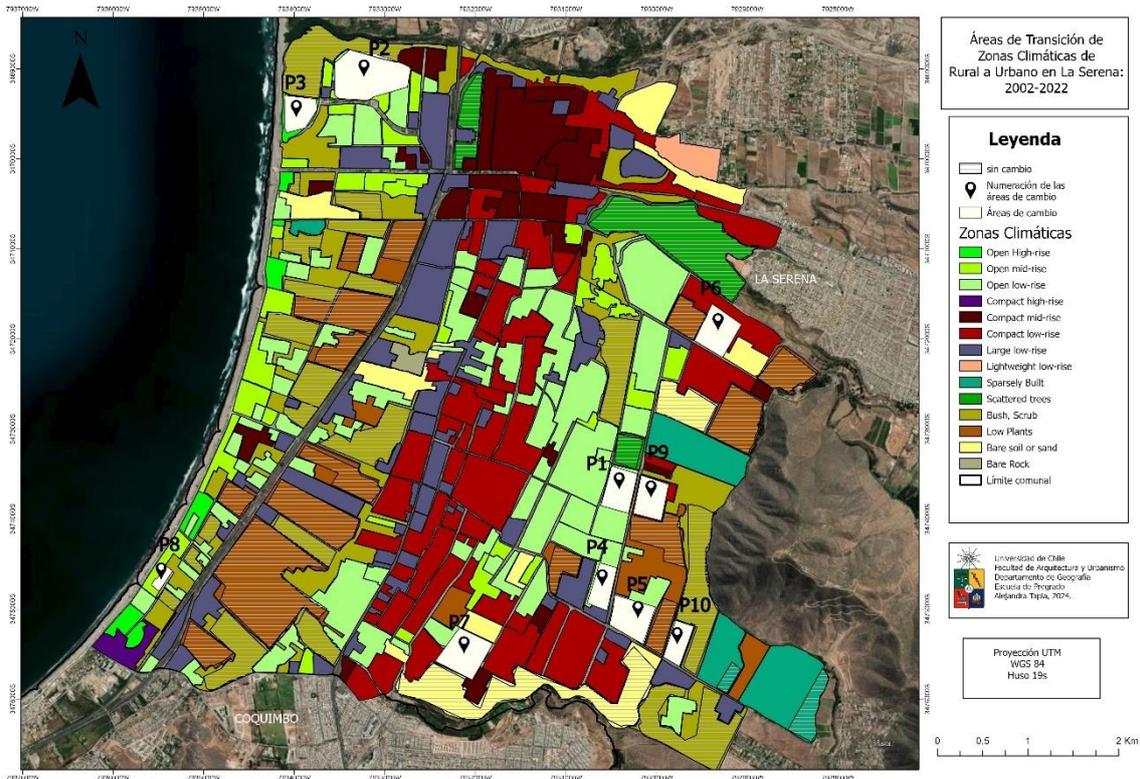
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2 Áreas de Cambio y Áreas sin cambio en La Serena

Como se observa en la cartografía 5, se identificaron alrededor de 30 áreas que permanecieron sin cambios durante el período de estudio. Estas áreas corresponden a zonas clasificadas como “*Sparsely built*”, “*Scattered trees*”, “*Low plants*”, y “*Bush, Scrub*”, siendo estas dos últimas las que tienen mayor extensión. Estas áreas se ubican en las periferias, observándose una concentración de las clasificaciones “*Low plants*” y “*Bush, Scrub*” en las zonas cercanas a la costa. Estas áreas corresponden a parcelas con desarrollo agrícola, praderas naturales y vegetación costera.

Por otro lado, se identificaron 10 áreas de cambio de zonas climáticas en la ciudad de La Serena. Similar a Rancagua, la mayoría de estas áreas se encuentran en las afueras de la ciudad, excepto dos que están ubicadas cerca del borde costero.

Cartografía 5: Áreas de cambio de zonas climáticas locales, de rural-urbano, entre los años 2002 a 2022 en la ciudad de La Serena.



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 5, las áreas de cambio tenían una clasificación de "low plants" y "brush, scrub" antes del periodo de urbanización, y la mayoría pasó a una clasificación de "open high rise". Además, se observa que el punto 7 tiene el periodo de urbanización más temprano, comenzando en 2007, mientras que los periodos más tardíos ocurrieron entre 2014 y 2015. El periodo donde se registraron la mayor cantidad de urbanizaciones fue entre 2012 y 2014.

Tabla 5: Periodo y tipo de cambio de clasificación de zonas climáticas de los puntos de transición rural a urbana, en la ciudad de La Serena.

Punto	zona climática antigua	periodo de cambio	zona climática nueva
1	low plants	2011-2013	open high rise
2	brush, scrub	2010-2014	open low rise
3	brush, scrub	2011-2013	open low rise
4	low plants	2008-2009	open low rise
5	low plants	2010-2013	open low rise
6	low plants	2012-2013	compact low rise
7	low plants	2007-2011	open low rise
8	brush, scrub	2012-2014	open mid-rise
9	low plants	2012-2014	open low rise
10	low plants	2012-2014	compact low rise

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Cambio Rural a Parcela con desarrollo urbano

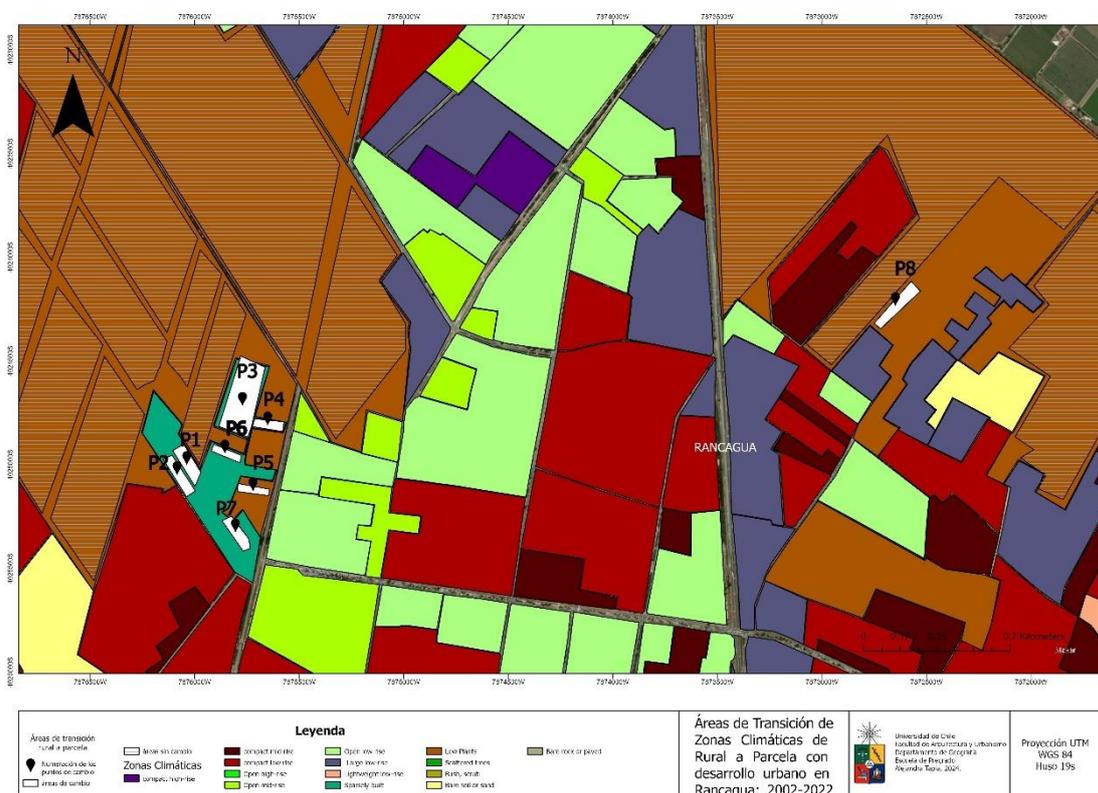
Se identificaron solo 10 áreas con este tipo de cambio, 8 en Rancagua y 2 en La Serena. En ambos casos, se observan períodos largos de urbanización.

A continuación, se detallan más los resultados para cada ciudad.

3.2.2.1. Áreas de cambio y Áreas sin cambio en Rancagua

Como se puede observar en la cartografía 6 se identificaron un total de 8 áreas de cambio de zona climática de rural a parcela con desarrollo urbano, todos ellos se ubicaban en la zona norte de la ciudad, y actualmente están clasificadas como “*sparsely built*”, y anteriormente eran “*low plants*”. En comparación con la transición hacia áreas urbanas, en este caso, el proceso de urbanización comenzó un poco más tarde.

Cartografía 6: Áreas de cambio de zonas climáticas locales, de rural a parcelas con desarrollo urbano, entre los años 2002 a 2022, en la ciudad de Rancagua.



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6 se observa que los períodos de urbanización son más tardíos en comparación con las áreas de cambio de rural a urbano. El punto 5 es el más tardío, comenzando su urbanización en 2018. Por otro lado, el punto 4 registra el período de urbanización más temprano y extenso, iniciando en 2010 y culminando en 2015. En este caso, al tratarse de parcelas particulares, la urbanización se realiza por etapas, como se evidencia en el punto 4 y otros puntos.

Tabla 6: Periodo y tipo de cambio de clasificación de zonas climáticas de los puntos de transición rural a parcela, en la ciudad de Rancagua.

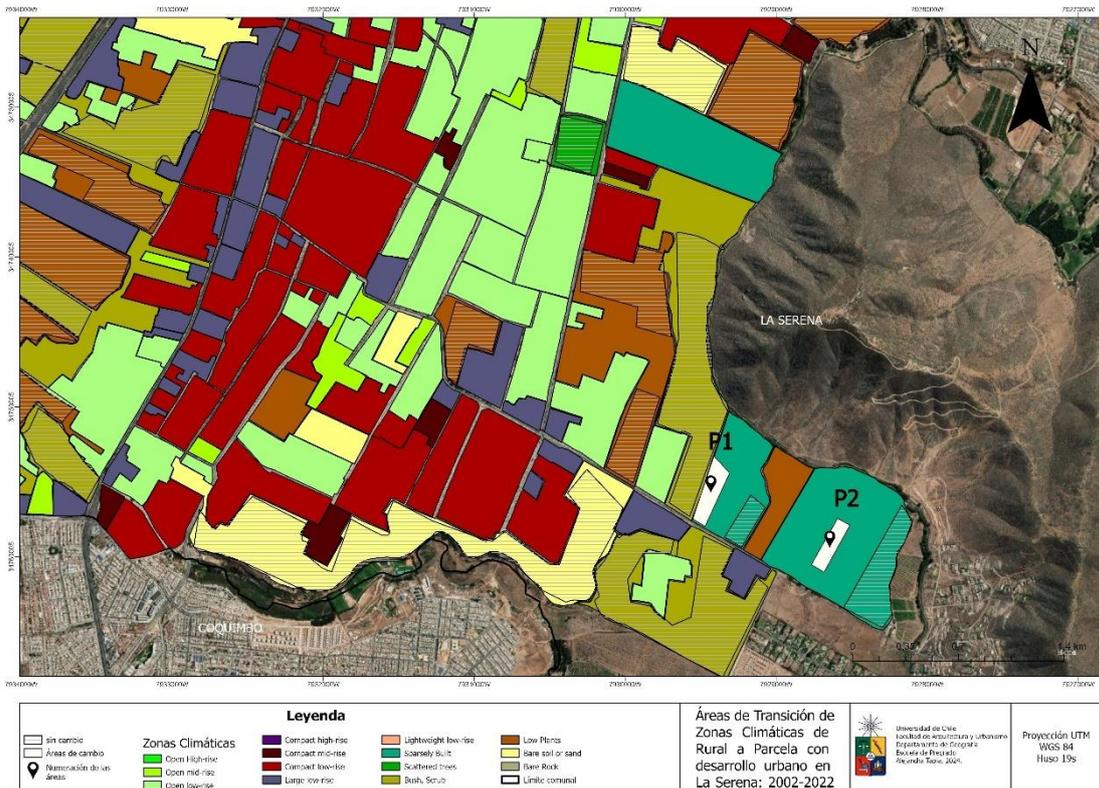
Punto	zona climática antigua	periodo de cambio	zona climática nueva
1	low plants	2015-2018	sparsely built
2	low plants	2012-2013	sparsely built
3	low plants	2016-2017	sparsely built
4	low plants	2007-2015	sparsely built
5	low plants	2018	sparsely built
6	low plants	2013-2018	sparsely built
7	low plants	2013-2019	sparsely built
8	low plants	2015-2018	sparsely built

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2 Áreas de cambio y Áreas sin cambio en La Serena

Como muestra la cartografía 7, se identificaron solo dos áreas de transición de rural a parcela en La Serena. Estas dos áreas, ubicadas muy cerca entre sí, se encuentran en las afueras de la ciudad, en el límite urbano. Aunque la ciudad presenta varias zonas de parcelas con desarrollo urbano clasificadas como "sparsely built", estas comenzaron su urbanización mucho antes de los períodos establecidos en este estudio, por lo cual, no fueron consideradas.

Cartografía 7: Áreas de cambio de zonas climáticas locales, de rural a parcelas con desarrollo urbano, entre los años 2002 a 2022, en la ciudad de La Serena.



Fuente: Elaboración propia

Los períodos de urbanización, como se observa en la tabla 7, comenzaron mucho antes que en Rancagua. Sin embargo, también se identifica que estos tienen un período prolongado. El tipo de zona climática previa era “*low plants*”, correspondiente a terrenos sin un uso particular.

Tabla 7: Período y tipo de cambio de clasificación de zonas climáticas de los puntos de transición rural a parcela, en la ciudad de Rancagua

Punto	zona climática antigua	período de cambio	zona climática nueva
1	low plants	2008-2013	Sparsely Built
2	low plants	2007-2010	Sparsely Built

Fuente: Elaboración propia

3.3 ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE PARA CADA ÁREA DE CAMBIO

3.3.1 Análisis estacional con Landsat 7.

El análisis estacional utilizando imágenes satelitales del Landsat 7 permitió identificar patrones de cambio en la temperatura superficial en los puntos seleccionados de estudio. Este análisis se realizó considerando las estaciones del año, destacando principalmente los períodos de verano e invierno debido a sus variaciones climáticas significativas.

A continuación, se detallan los resultados encontrados para los puntos específicos de estudio:

3.3.1.1 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Urbano en Rancagua

El análisis realizado con Landsat 7 reveló una concordancia en 6 puntos de los 10 analizados, en relación con el aumento de la temperatura media y el inicio del proceso de urbanización. Esta observación se hizo durante el período de verano. En el caso del período de invierno, no se observaron diferencias significativas entre la temperatura media de los puntos de cambio y los puntos sin cambio.

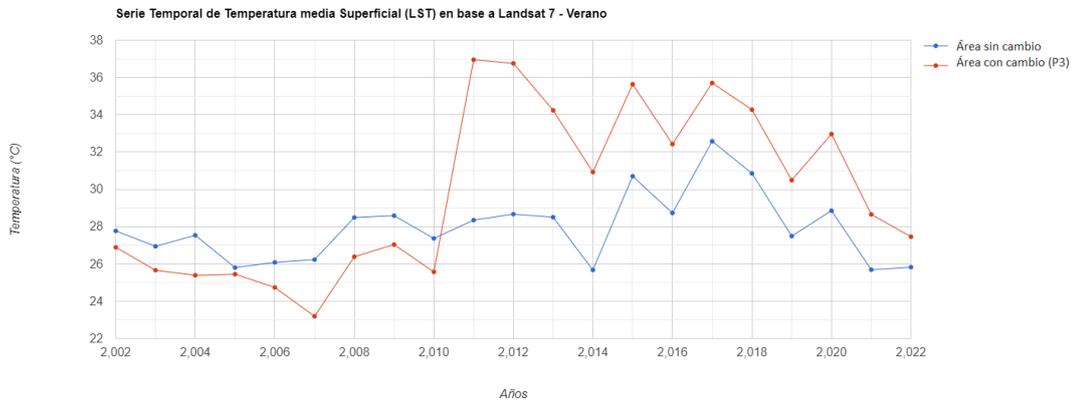
Los puntos que presentaron diferencias fueron los puntos 3, 4, 6, 7, 9 y 10, y los que se detallan a continuación son 4 de estos puntos, que fueron los que presentaron las mayores diferencias, solo durante las estaciones de verano. Para más detalles sobre los demás puntos, consulte los anexos.

Punto 3:

Como se muestra en el gráfico 1, el punto 3 presentaba, durante los veranos de 2002 a 2010, temperaturas y tendencias similares a los puntos sin cambio. Sin embargo, en 2011, la temperatura media aumentó considerablemente, pasando de 25,56 °C en el

verano de 2010 a 36,94 °C en el verano de 2011. Este cambio coincide con el proceso de urbanización que experimentó esta área.

Gráfico 1: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 3 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



Fuente: Elaboración propia

Antes del cambio, como se observa en la imagen (figura 2), esta área era un gran y único sector agrícola, con una temperatura promedio de verano de 25,58 °C. A fines de 2010, comenzó a urbanizarse, dejando el terreno al descubierto entre 2011 y 2013. Durante este periodo, la temperatura aumentó, alcanzando un promedio de 35,97 °C. Fue precisamente durante estos años cuando el área presentó las mayores temperaturas. Posteriormente, la temperatura comenzó a disminuir, siguiendo los patrones del punto sin cambio, y durante el periodo en que el área ya estaba urbanizada, la temperatura promedio fue de 31,78 °C.

Figura 2: Imágenes del punto 3 de cambio rural-urbano de Rancagua, antes, durante, y después del proceso de urbanización

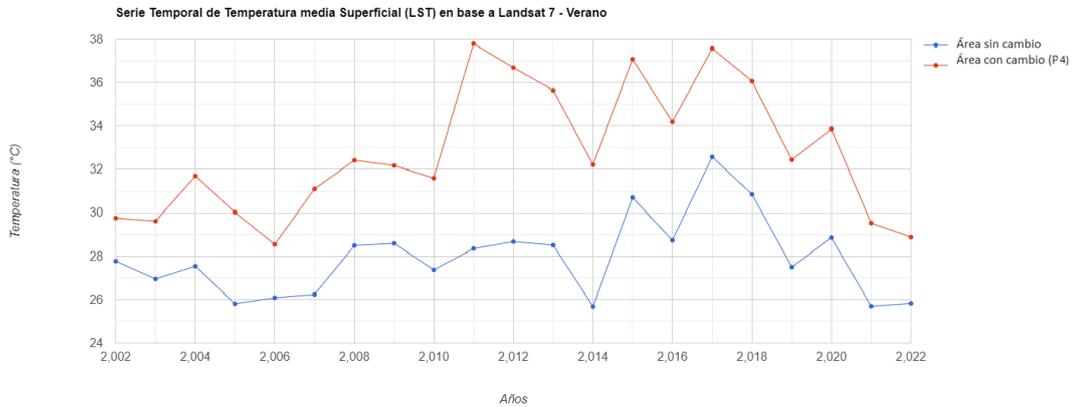


Fuente: Elaboración propia

Punto 4:

En el caso del punto 4, también se observó que presentaba temperaturas y tendencias similares al punto sin cambio antes de 2011. Como se observa en el gráfico 2, en ese año, la temperatura media pasó de 31,6 °C a 37,8 °C en el verano de 2011. Después de este año, la tendencia comenzó a bajar y se reguló nuevamente con la tendencia del punto sin cambio en 2014.

Gráfico 2: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 4 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las imágenes (figura 3), el área antes de la urbanización era un sector agrícola, dividido en varias parcelas con destinado de plantación, durante ese periodo el área presento un promedio de temperatura de verano de 30,66, es en el año 2011 donde comienza el periodo de urbanización, durante este periodo el promedio aumenta a 36,71, posteriormente cuando el área ya está urbanizada presenta un promedio de 33,54.

Figura 3: Imágenes del punto 4 de cambio rural-urbano de Rancagua, antes, durante, y después del proceso de urbanización

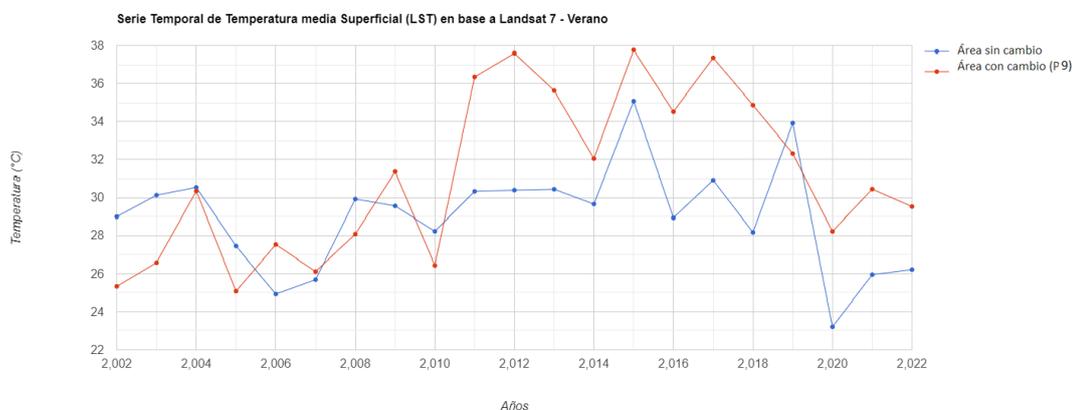


Fuente: Elaboración propia

Punto 9:

Como se observa en el gráfico 3, el punto número 9 también mostró un aumento de la temperatura media en 2011, pasando de 26,43 °C a 36,35 °C. Sin embargo, presentó un nuevo aumento al año siguiente, para luego comenzar a disminuir, igualándose en 2014 a la tendencia del punto sin cambio.

Gráfico 3: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 9 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las imágenes, (figura 4) el área antes del periodo de urbanización era una gran zona agrícola. Durante el periodo de 2002 a 2010, esta área presentaba una temperatura promedio de verano de 27,2 °C. Posteriormente, en 2011, comenzó el periodo de urbanización, durante el cual la temperatura promedio aumentó a 36,56 °C. Finalmente, después de estos años, el sector se encontraba completamente urbanizado, presentando una temperatura promedio de 32,83 °C.

Figura 4: Imágenes del punto 9 de cambio rural-urbano de Rancagua, antes, durante, y después del proceso de urbanización

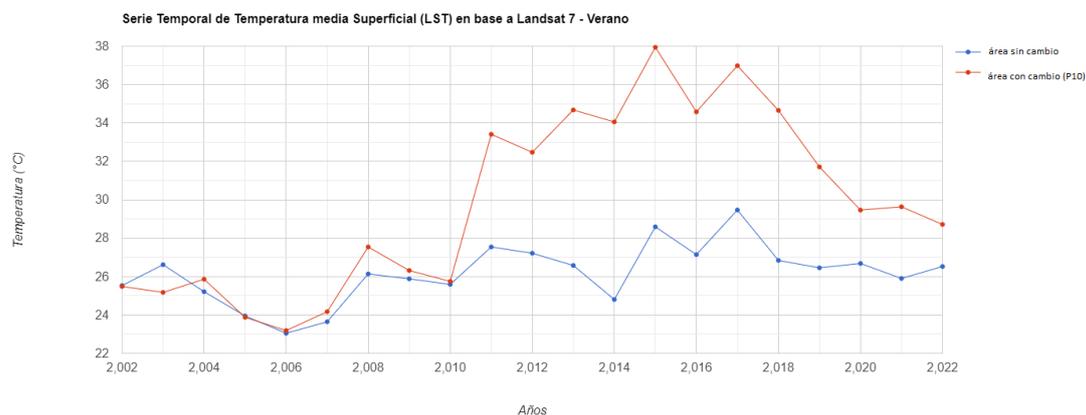


Fuente: Elaboración propia

Punto 10

Por último, el punto 10, como se observa en el gráfico 4 también registró un aumento de temperatura en 2011, pasando de 25,74 °C en 2010 a 33,41 °C. Posteriormente, presentó fluctuaciones hasta 2014, cuando comenzó a igualar la tendencia del punto sin cambio. No obstante, se observaron diferencias considerables hasta 2017, con variaciones de hasta 10 grados, antes de que la temperatura media comenzara a disminuir y se igualara con la del punto sin cambio.

Gráfico 4: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 10 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 5, el área del punto 10 antes de la urbanización correspondía a un sector agrícola, probablemente de plantación de viñedos. En ese entonces, presentaba una temperatura media de verano de 24,98 °C. Posteriormente, comenzó su periodo de urbanización en 2011, aumentando en ese periodo a una temperatura media de 33,52 °C. Finalmente, una vez urbanizado el sector, la temperatura media fue de 33,25 °C.

Figura 5: Imágenes del punto 10 de cambio rural-urbano de Rancagua, antes, durante, y después del proceso de urbanización



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Urbano en La Serena

El análisis realizado con Landsat 7 en La Serena reveló una concordancia en tres puntos específicos en relación con el aumento de la temperatura media y el inicio del proceso de urbanización durante el periodo de verano. En el periodo de invierno, no se encontraron cambios significativos en los puntos durante el proceso de urbanización, manteniendo las mismas tendencias que los puntos sin cambio.

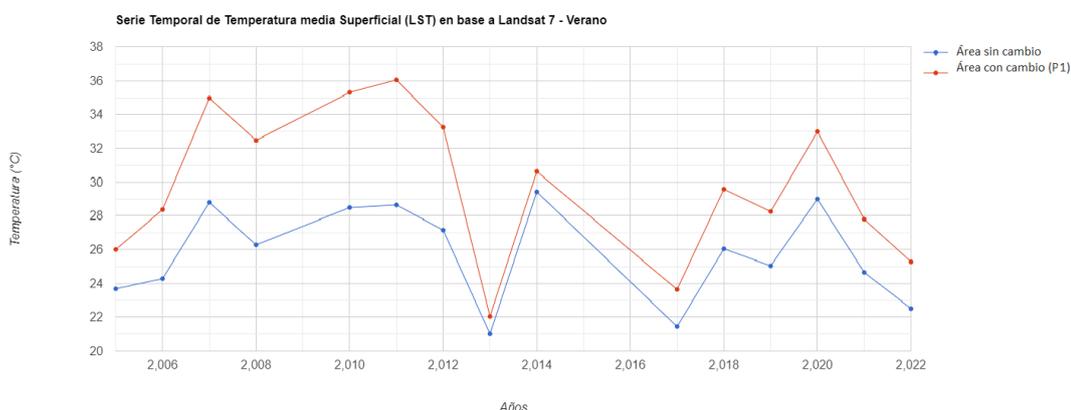
A diferencia de los puntos en Rancagua, se observó a nivel general que en estos 3 puntos después del proceso de urbanización se produjo una disminución de la temperatura media en los años posteriores.

A continuación, se procederá a analizar los puntos, resaltando que los más relevantes fueron el punto 1, 3 y 7. Para más detalles sobre los demás puntos, consulte los anexos.

Punto 1:

Según se muestra en el gráfico 5, el punto 1 exhibía tendencias similares al área sin cambios, hasta que en el año 2011 experimentó un cambio notable al registrar un aumento significativo en su temperatura media durante el verano, pasando de una temperatura de 35,3 °C en el verano de 2010 a una de 36,05°C en el verano de 2011.

Gráfico 5: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.



Fuente: Elaboración propia

Además, al observar la imagen (figura 6) se evidencia que el área correspondiente al punto era previamente un extenso terreno agrícola, con una temperatura promedio de verano de 31,42 °C. Sin embargo, a partir del año 2011, se inicia el proceso de urbanización, marcado por la preparación del suelo a finales de 2010, lo cual coincide con el cambio en la tendencia y el consiguiente aumento de temperatura. Durante el período comprendido entre 2011 y 2013, la temperatura promedio se sitúa en 30,44 °C. Finalmente, el área se transforma en un sector residencial, registrando una disminución en la temperatura promedio, la cual se estabiliza en 28,30 °C.

Figura 6: Imágenes del punto 1 de cambio rural-urbano de La Serena, antes, durante, y después del proceso de urbanización

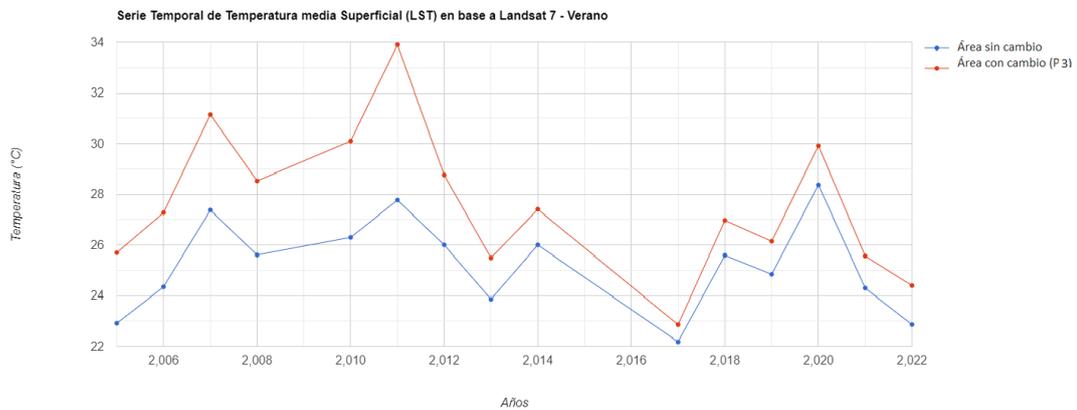


Fuente: Elaboración propia

Punto 3:

En relación con el punto 3, como se evidencia en el gráfico 6, el área alcanzó su temperatura media más alta durante el verano de 2011, registrando un máximo de 33,91 °C. Sin embargo, posteriormente experimentó una disminución en sus temperaturas medias.

Gráfico 6: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 3 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



Fuente: Elaboración propia

Al observar la imagen (figura 7), se aprecia que el área se encuentra en una ubicación costera cercana al mar. Antes del periodo de urbanización, era un sector cubierto por vegetación costera, con una temperatura promedio de 28,55 °C. El proceso de urbanización comenzó en 2011, iniciando con la remoción de la vegetación a finales del año anterior. Este periodo abarcó desde 2011 hasta 2013, presentando una temperatura promedio de 29,39 °C. Posteriormente, el área se transformó en un resort con piscina artificial, presentando una temperatura promedio de 26,18 °C.

Figura 7: Imágenes del punto 3 de cambio rural-urbano de La Serena, antes, durante, y después del proceso de urbanización

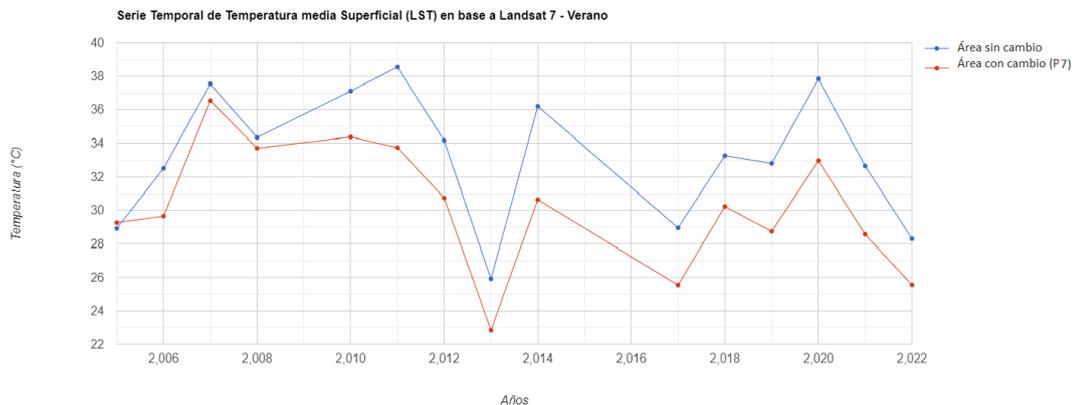


Fuente: Elaboración propia

Punto 7:

Por último, el punto 7, como se muestra en el gráfico 7 se distingue de todas las demás áreas analizadas en este estudio, ya que en este caso es el punto sin cambios el que registra las temperaturas medias más altas. A pesar de ello, se observa que la temperatura media también aumenta en el año en que comienza el proceso de urbanización, alcanzando su punto máximo ese año, con 36,54 °C. Sin embargo, se observa una similitud con el punto sin cambios, lo que sugiere que este aumento podría deberse a otro factor.

Gráfico 7: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 7 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.



Fuente: Elaboración propia

En la imagen (figura 8), se puede notar que el área anteriormente correspondía a un terreno baldío, sin un uso específico, y durante esos años la temperatura promedio era de 29,46 °C. Posteriormente, en 2007, comenzó el período de urbanización, marcado por la exposición de la tierra a fines del año anterior. Este proceso se llevó a cabo en etapas, finalizando en el año 2011, con una temperatura promedio de 34,59 °C. Finalmente, el área se convirtió en un sector residencial, presentando una temperatura promedio de 28,38 °C.

Figura 8: Imágenes del punto 7 de cambio rural-urbano de La Serena, antes, durante, y después del proceso de urbanización

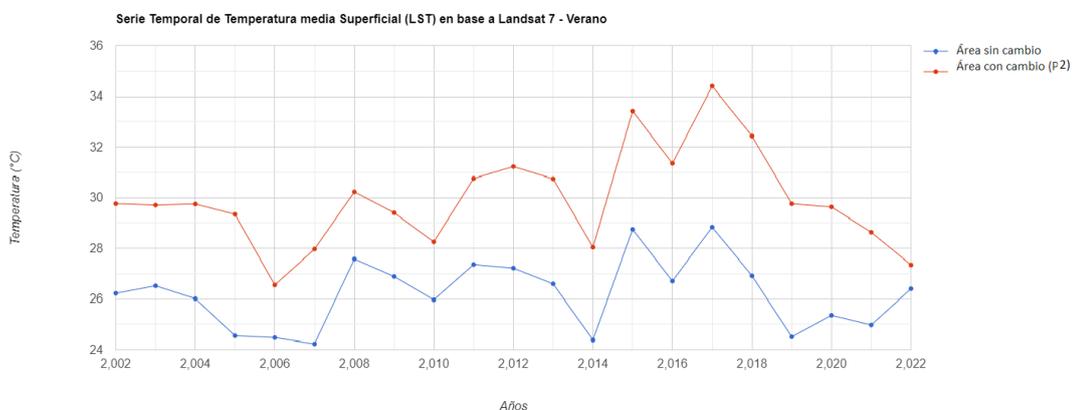


Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Parcelas en Rancagua

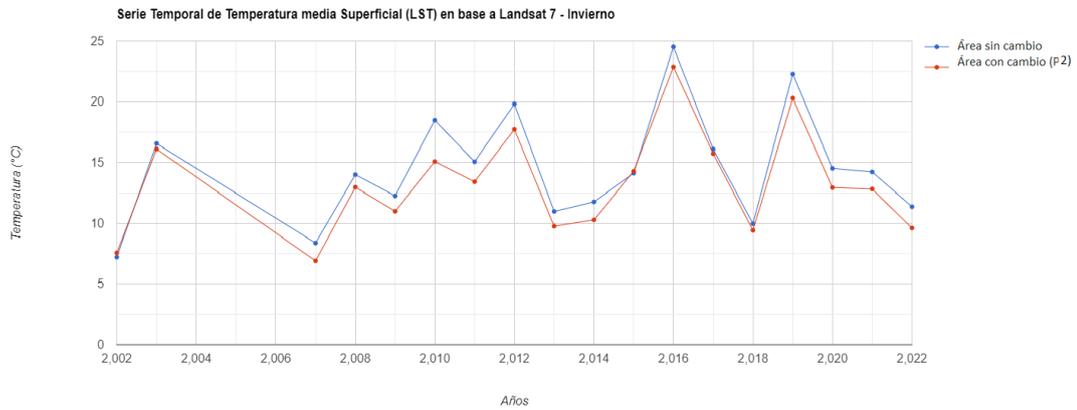
En relación con los puntos analizados para los cambios de rural a parcelas, no se observaron cambios relevantes atribuibles al periodo de urbanización. Como se puede observar en los gráficos (gráficos 8, 9, 10 y 11), tanto en invierno como en verano, los puntos de cambio y los puntos sin cambio presentan tendencias similares, con diferencias de tan solo 2 o 3 grados aproximadamente. Durante los periodos de urbanización, que comenzaron en 2013, no se observan cambios significativos en ambos casos. En el caso del punto 6, que experimentó otro proceso de urbanización en 2018, tampoco se observaron cambios relevantes.

Gráfico 8: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.



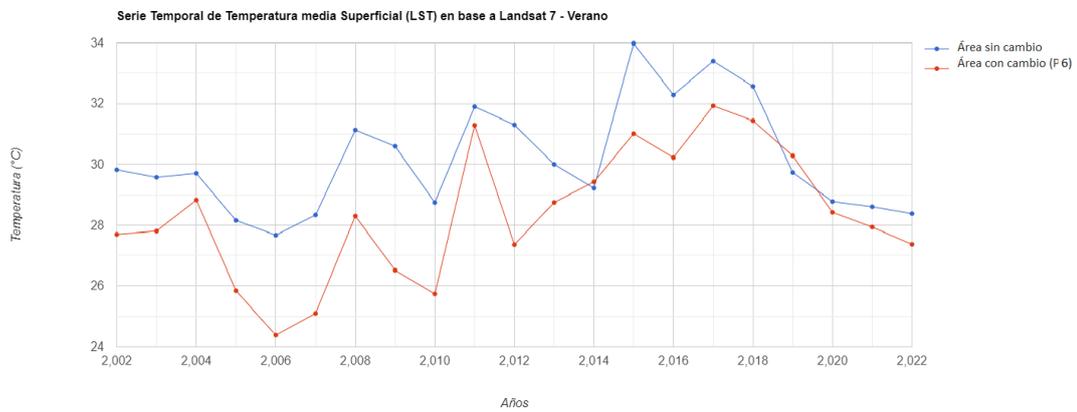
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 9: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.



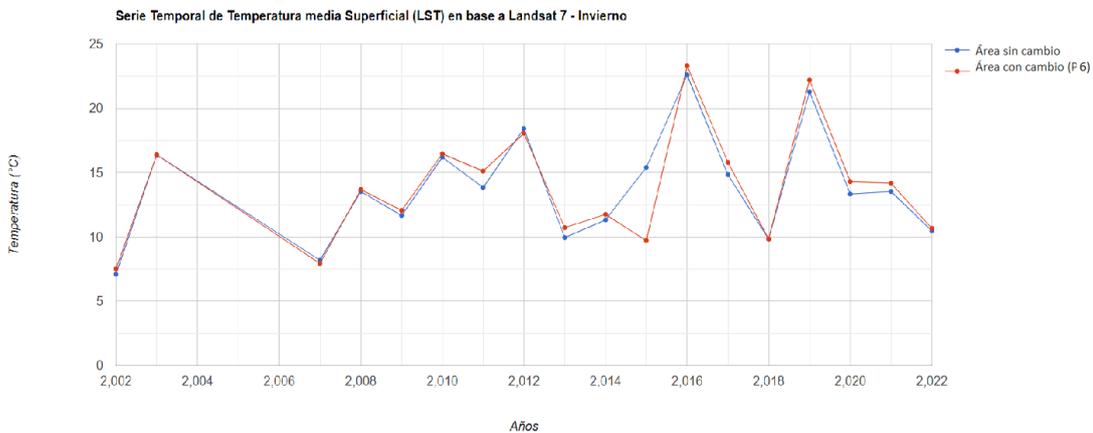
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 10: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 11: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.

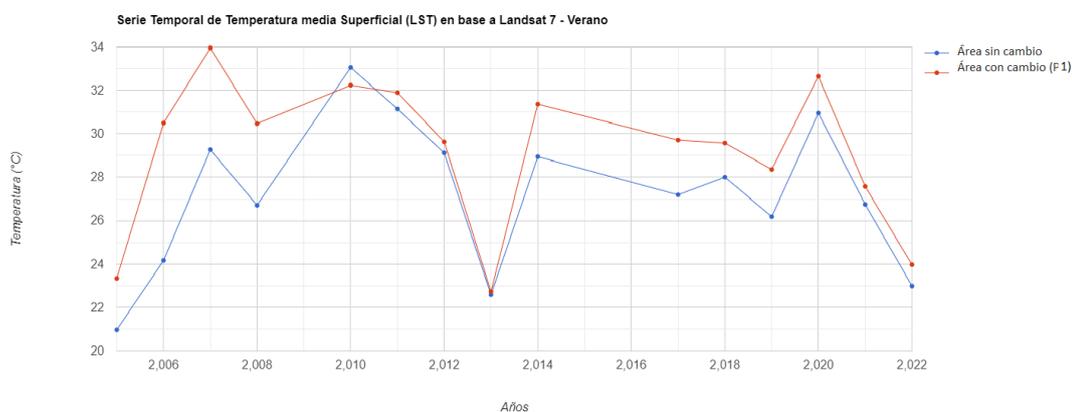


Fuente: elaboración propia

3.3.1.4 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Parcelas en La Serena

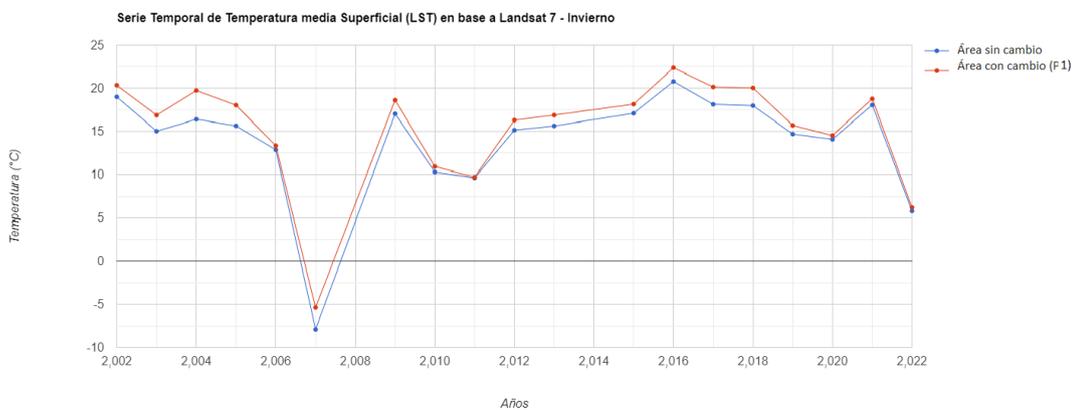
En relación con los puntos analizados para los cambios de rural a parcelas en La Serena, donde solo se dispuso de dos puntos de cambio, no se observaron cambios relevantes atribuibles al periodo de urbanización. Como se puede observar en los gráficos (gráficos 12, 13, 14 y 15), tanto en invierno como en verano, los puntos de cambio y los puntos sin cambio presentan tendencias similares, con diferencias de tan solo 1 o 2 grados aproximadamente. Durante los periodos de urbanización, que comenzaron en 2010 y 2009 respectivamente, no se observan cambios significativos en ambos casos.

Gráfico 12: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.



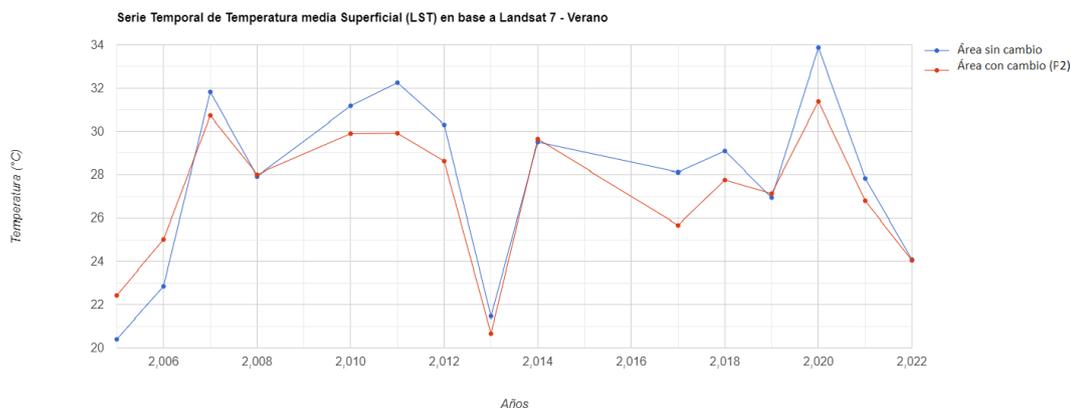
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 12: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.



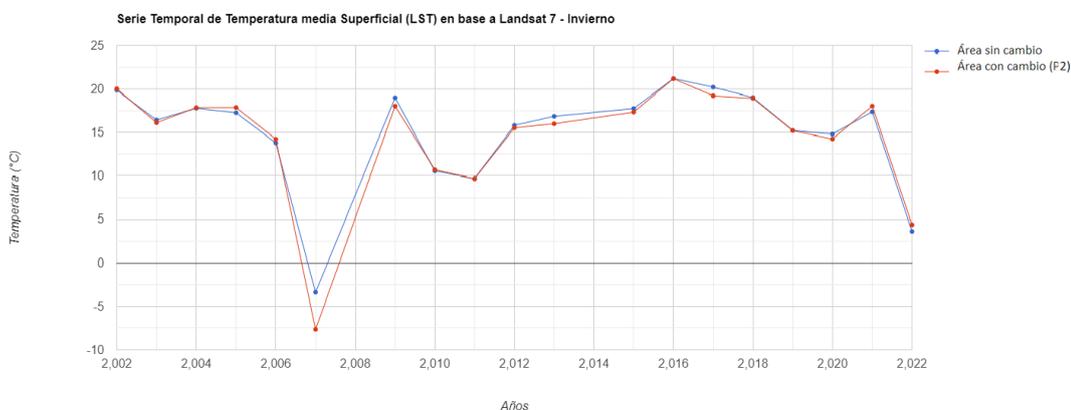
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 14: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 15: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en Landsat 7.



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Análisis Estacional con MODIS

El análisis estacional utilizando imágenes satelitales del MODIS no reveló hallazgos significativos, a diferencia de los obtenidos con Landsat 7.

A continuación, se detallan los resultados encontrados para los puntos específicos de estudio:

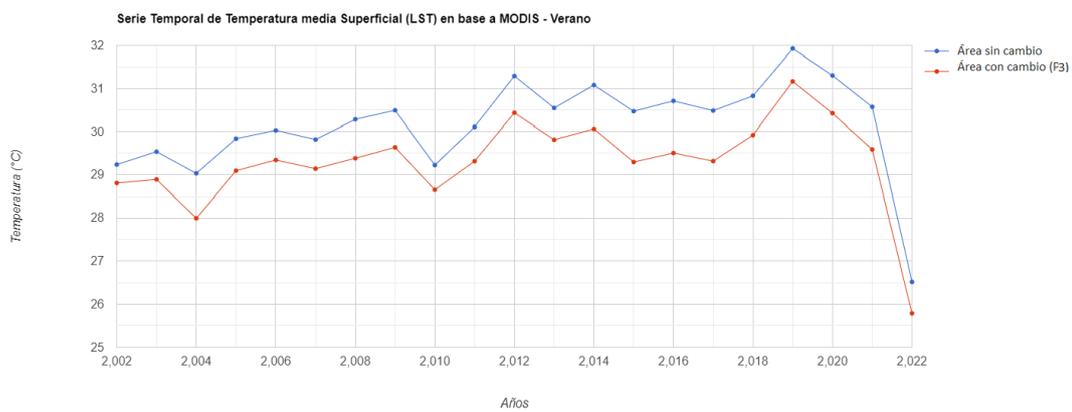
3.3.2.1 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Urbano en Rancagua

El análisis estacional con MODIS no reveló cambios significativos en la temperatura media asociados con el proceso de urbanización en ninguna de las áreas representativas de cambio rural-urbano. A continuación, se presentan los gráficos de

verano para los mismos cuatro puntos (3, 4, 9 y 10) que mostraron cambios significativos en Landsat, para facilitar la comparación.

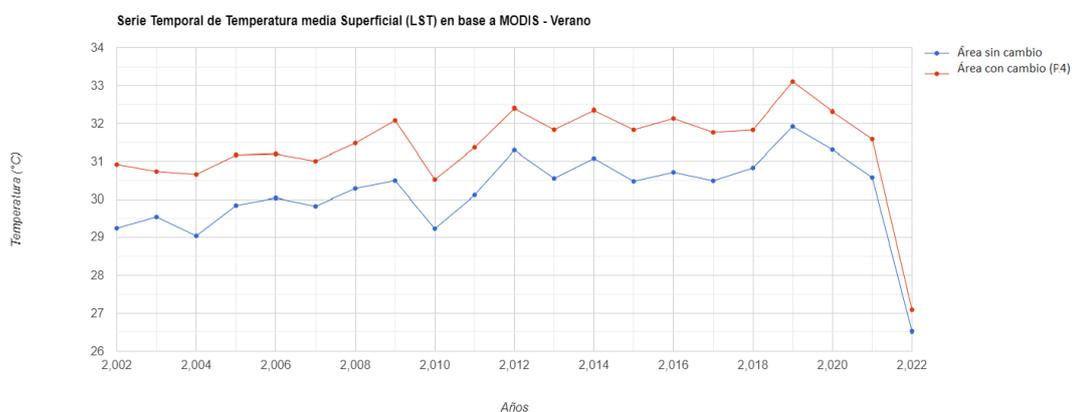
Como se puede observar en los gráficos (gráficos 16, 17, 18 y 19), las temperaturas registradas por MODIS en estas áreas no muestran las variaciones significativas que se observaron en los datos de Landsat. A pesar de que se puede observar un aumento de la temperatura gradualmente a través de los años, las áreas de cambio y las sin cambio presentan tendencias similares y diferencias mínimas, por lo cual, no se puede asegurar si esto se debe a la urbanización o se debe a otra causa.

Gráfico 16: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 3 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



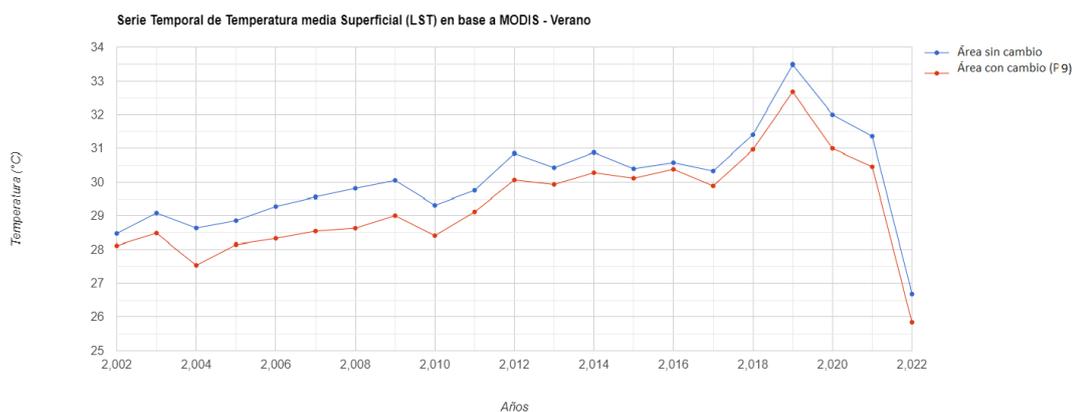
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 17: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 4 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



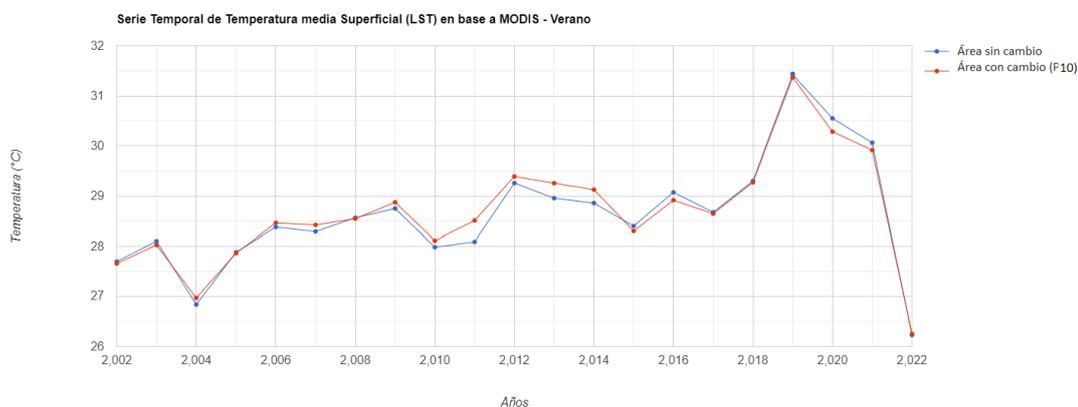
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 18: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 9 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 19: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 10 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

Esta misma tendencia se observó en todos los demás puntos, los cuales están incluidos en los anexos.

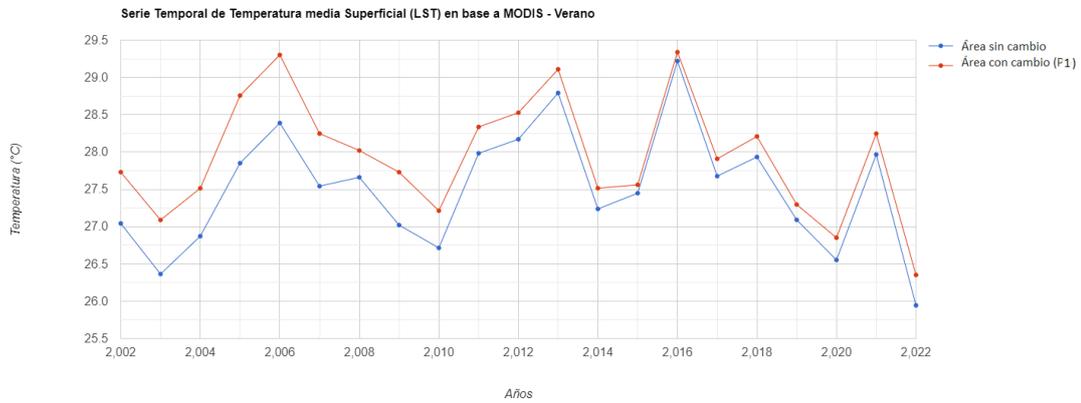
3.3.2.2 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Urbano en La Serena

Al igual que ocurrió en la ciudad de Rancagua el análisis estacional con MODIS no reveló cambios significativos en la temperatura media asociados con el proceso de urbanización en ninguno de los puntos representativos de cambio rural-urbano en La Serena. A continuación, se presentan los gráficos de verano para los mismos puntos (1, 3 y 7) que mostraron cambios significativos en Landsat, para facilitar la comparación.

Como se puede observar en los gráficos (gráficos 20, 21 y 22), las temperaturas registradas por MODIS en estos puntos no muestran las variaciones significativas que se observaron en los datos de Landsat. Como en Rancagua, las áreas de cambio y las áreas sin cambio presentan tendencias similares y diferencias mínimas, tanto en invierno como en verano. Inclusive como se observa en el gráfico 21 en el punto 3 la

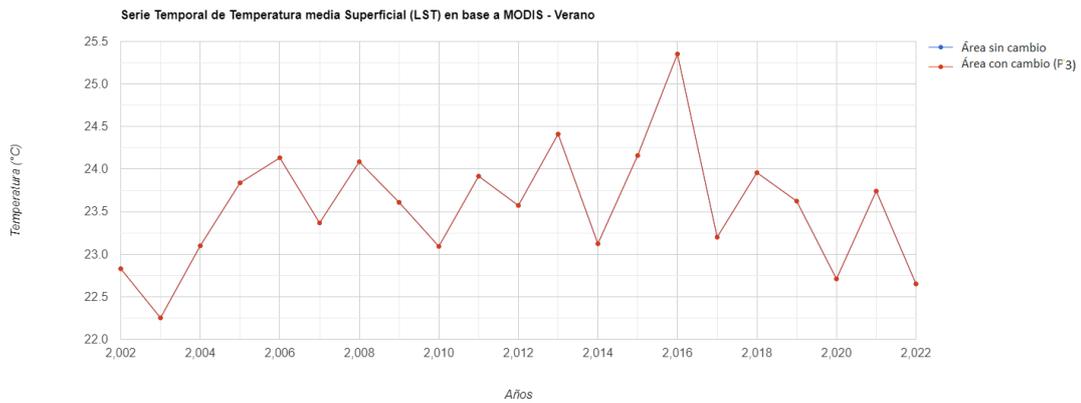
similitud de temperaturas entre las áreas sin cambio y con cambio es tanta que se distingue una sola línea en el gráfico.

Gráfico 20: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



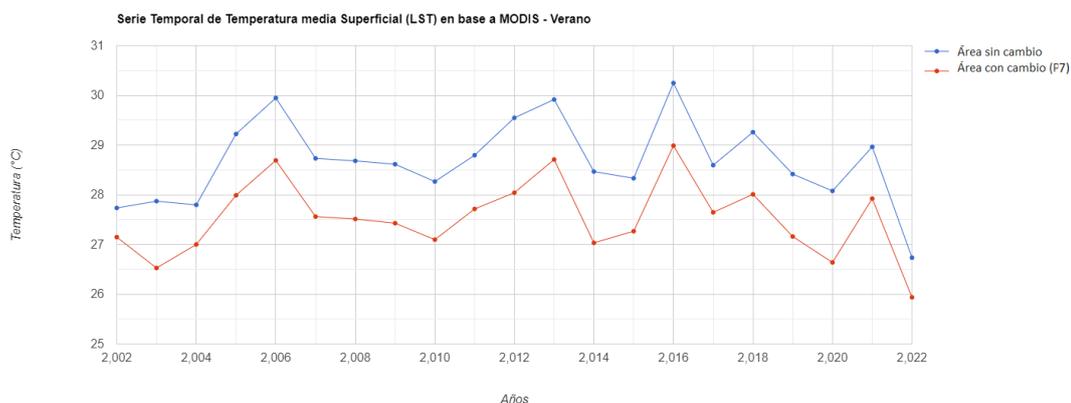
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 21: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 3 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 22: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 7 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

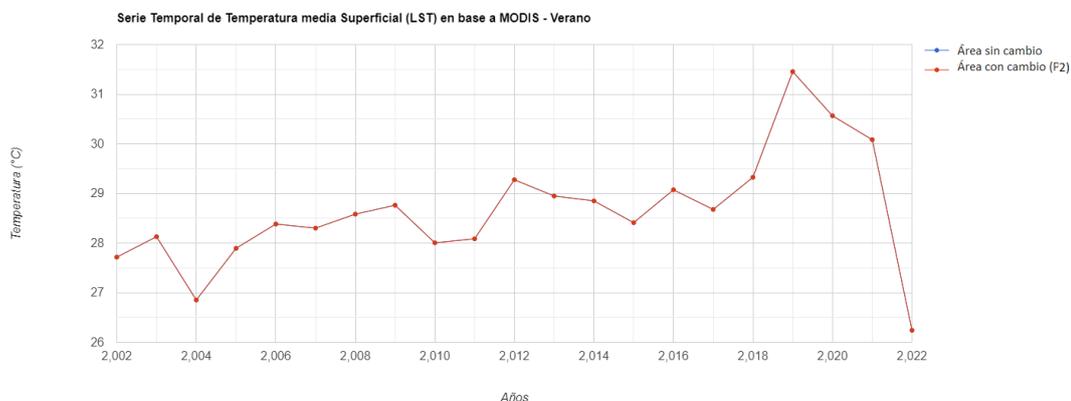
3.3.2.3 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Parcela en Rancagua

De manera similar, los puntos representativos de cambio rural-parcelas analizados con Landsat no mostraron cambios significativos en la temperatura media atribuibles al proceso de urbanización. Tanto en invierno como en verano, las temperaturas en los puntos de cambio se mantuvieron similares a las de los puntos sin cambio, con diferencias mínimas y no significativas.

En los gráficos 23, 24 y 25, aunque se incluye la curva para el área sin cambio en la leyenda (curva azul), esta no se distingue visualmente porque sus valores son prácticamente iguales a los de la curva de los puntos con cambio (curva roja). Dado que ambas curvas coinciden casi por completo, no es posible observar una separación clara en el gráfico.

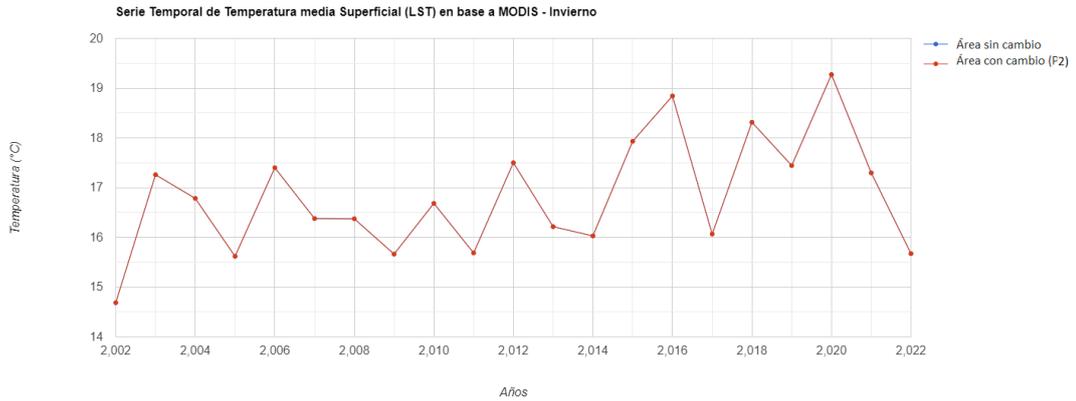
Los gráficos de invierno y verano para estos puntos también se incluyen en los anexos para una revisión detallada.

Gráfico 23: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.



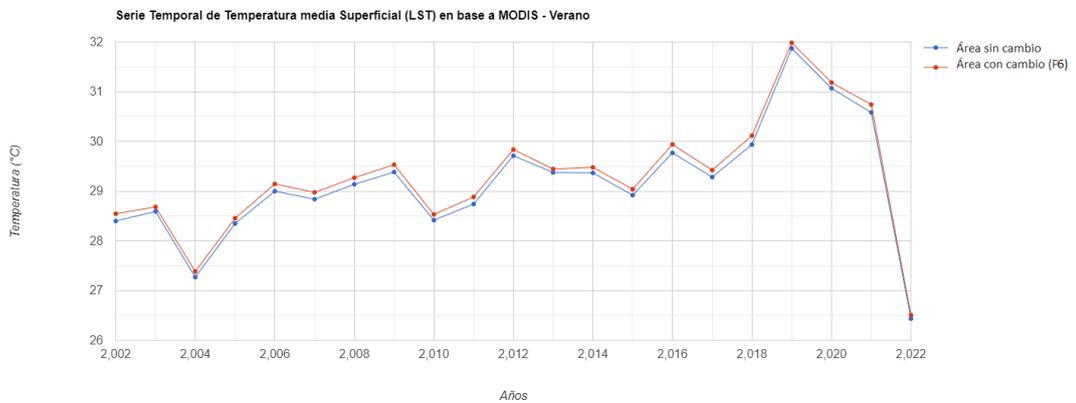
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 24: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.



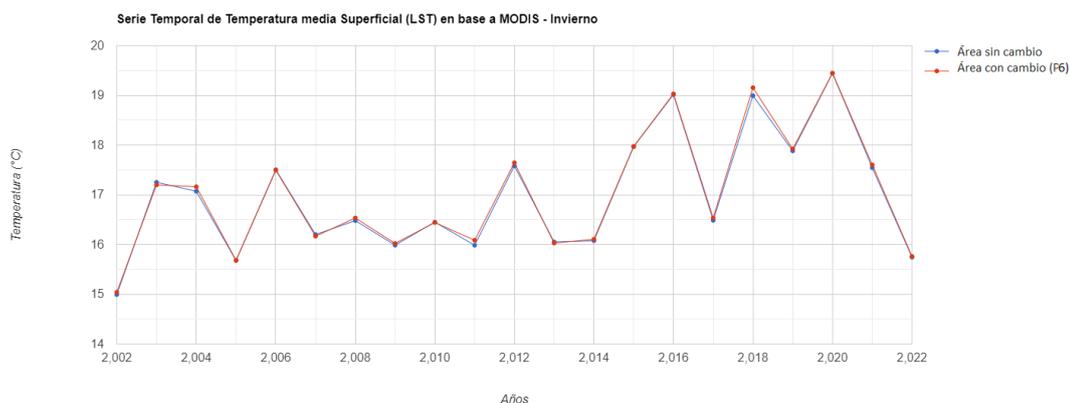
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 25: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 26: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

Los gráficos de invierno y verano para los otros puntos también se incluyen en los anexos para una revisión detallada.

3.3.2.4 Análisis de la Temperatura Superficial en el Cambio Rural-Parcela en La Serena

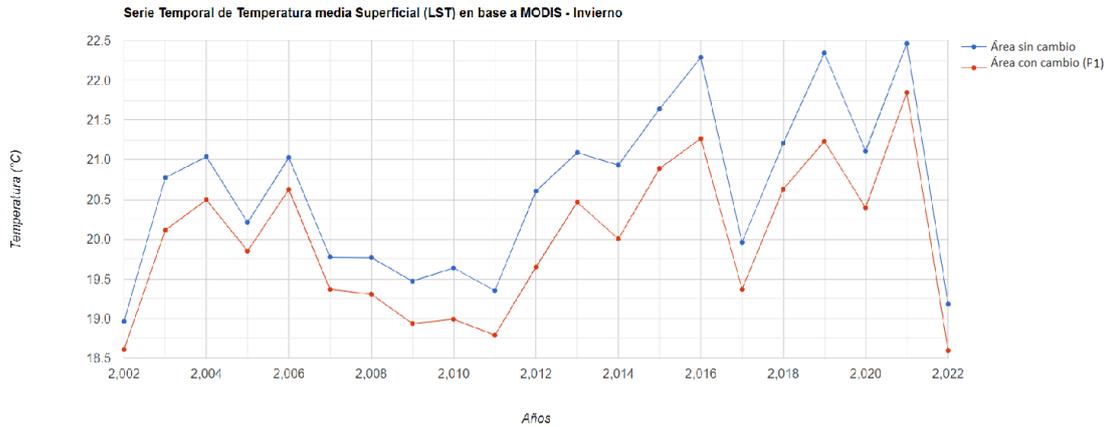
De manera similar, los puntos representativos de cambio rural-parcelas analizados con Landsat no mostraron cambios significativos en la temperatura media atribuibles al proceso de urbanización. En este caso, se observa un aumento de la temperatura media posterior al proceso de urbanización tanto en invierno como en verano. Sin embargo, las temperaturas en los puntos de cambio se mantuvieron similares a las de los puntos sin cambio, con diferencias mínimas y no significativas. Incluso, como se observa en los gráficos 29 y 30 del punto 2, las temperaturas del punto de cambio y sin cambio son casi iguales, lo que se refleja en el gráfico como una sola línea. Por consiguiente, este aumento podría estar influenciado por otras causas.

Gráfico 27: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 28: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.



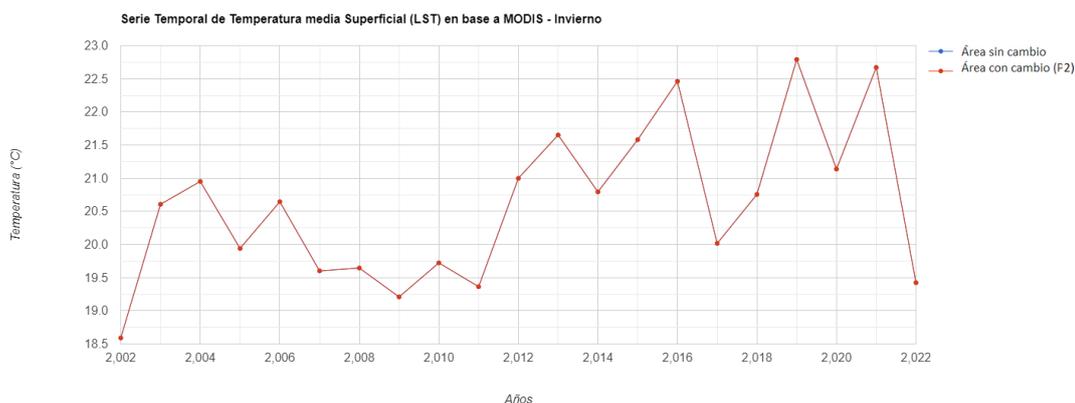
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 29: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 30: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Parcela Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

3.4 COMPARACIÓN Y PROMEDIOS INTEGRADOS

3.4.1 Comparación de la media de verano e invierno antes y después del proceso de urbanización.

Al analizar las temperaturas medias de verano e invierno para los puntos de cambio rural-urbano utilizando datos de Landsat 7 y MODIS, se observa una variabilidad interesante. Como se observa en la tabla 8, en verano, el punto 5 en Rancagua muestra un aumento significativo en la temperatura media después del proceso de urbanización según Landsat 7, pasando de 25,58°C (2002-2010) a 31,78°C (2014-2022), una diferencia de más de 6°C. Sin embargo, MODIS no refleja un cambio tan drástico, con temperaturas de 28,99°C antes y 29,19°C después. En contraste, el punto 3 en La Serena presenta una ligera disminución en la temperatura media de verano según Landsat 7, de 28,55°C a 25,98°C, mientras que MODIS muestra un pequeño incremento de 23,37°C a 23,81°C.

Tabla 8: Comparación de la Temperatura Media de Verano Antes y Después del Proceso de Urbanización en La Serena y Rancagua Usando Landsat 7 y MODIS

Comparación temperatura media de verano				
Puntos y ciudades	Antes (2002-2010)		Después (2014-2022)	
	Landsat 7	MODIS	Landsat 7	MODIS
Punto 5 en Rancagua	25,58°C	28,99°C	31,78°C	29,19°C
Punto 3 en La Serena	28,55°C	23,37°C	25,98°C	23,81°C

Fuente: Elaboración propia

Como se ve en la tabla 9, en invierno, los cambios son menos pronunciados. Para el punto 5 en Rancagua, Landsat 7 registra un aumento de temperatura de 12,75°C a 13,76°C, y MODIS de 16,26°C a 17,55°C. En La Serena, el punto 3 presenta una

temperatura media invernal ligeramente superior después del proceso de urbanización según Landsat 7, de 16,05°C a 16,89°C, mientras que los datos de MODIS prácticamente no cambian, con 17,13°C antes y 17,06°C después.

Tabla 9: Comparación de la Temperatura Media de Invierno Antes y Después del Proceso de Urbanización en La Serena y Rancagua Usando Landsat 7 y MODIS

Comparación temperatura media de invierno				
Puntos y ciudades	Antes (2002-2010)		Después (2014-2022)	
	Landsat 7	MODIS	Landsat 7	MODIS
Punto 5 en Rancagua	12,75°C	16,26°C	13,76°C	17,55°C
Punto 3 en La Serena	16,05°C	17,13°C	16,89°C	17,06°C

Fuente: Elaboración propia

En resumen, los datos de Landsat 7 indican cambios más notables en las temperaturas de verano en los puntos de urbanización, especialmente en Rancagua, mientras que MODIS no muestra cambios significativos en ninguno de los puntos y temporadas, sugiriendo una menor sensibilidad a variaciones locales de temperatura debido a la urbanización.

3.4.2 Comparación de Temperaturas en Puntos de Cambio Rural-Urbano en Días Específicos

El análisis de la tabla de comparación de temperaturas entre los datos de MODIS y Landsat 7 para los puntos 5 y 6 en Rancagua en días específicos revela varias observaciones clave. Como se observa en la tabla 10, el 17 de febrero de 2002, las temperaturas registradas por MODIS (35,7°C para el punto 5 y 33,55°C para el punto 6) son considerablemente más altas que las registradas por Landsat 7 (26,47°C y 27,51°C respectivamente). El 12 de enero de 2012, durante el periodo de urbanización, ambas ubicaciones muestran un aumento significativo en las temperaturas: MODIS registra 43,53°C y 44,93°C, mientras que Landsat 7 muestra 40,55°C y 41,33°C. Este incremento refleja el impacto de la urbanización, aunque MODIS sigue presentando temperaturas más altas que Landsat 7. El 7 de enero de 2022, se observa una disminución de las temperaturas en comparación con 2012, pero MODIS aún muestra valores superiores (39,05°C y 42,34°C) en comparación con Landsat 7 (29,41°C y 31,40°C). Esta discrepancia entre los sensores sugiere diferencias en la sensibilidad y la resolución espacial, aunque ambos indican una tendencia de aumento de temperatura asociada con la urbanización y una disminución reciente post-urbanización.

Tabla 10: Comparación de Temperaturas en Puntos de Cambio Rural-Urbano en Rancagua: Datos de MODIS vs. Landsat 7 en Días Específicos

Ciudad	Punto	Fecha	Temperatura Modis	Temperatura Landsat 7
Rancagua	5	17-02-2002	35,7° C	26,47° C
Rancagua	6	17-02-2002	33,55° C	27,51° C
Rancagua	5	12-01-2012	43,53° C	40,55° C
Rancagua	6	12-01-2012	44,93° C	41,33° C
Rancagua	5	07-01-2022	39,05° C	29,41° C
Rancagua	6	07-01-2022	42,34° C	31,40° C

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. DISCUSIÓN

Este estudio puso de manifiesto incrementos significativos en la temperatura media durante el verano, especialmente en la ciudad de Rancagua. Los puntos 3, 4, 6, 7, 9 y 10 exhibieron aumentos notables después del inicio del proceso de urbanización, registrando un aumento promedio de casi 6 grados en la temperatura media de verano posterior a la urbanización en comparación con los niveles previos. Además, la mayoría de los picos de temperatura y las temperaturas medias más altas se produjeron durante el proceso de urbanización, especialmente cuando la tierra estaba al descubierto. Posteriormente, la temperatura media disminuyó tras la urbanización completa. Esto sugiere que la exposición del suelo durante la construcción contribuye significativamente al aumento de la temperatura, mientras que la estabilización ocurre después del desarrollo urbano. Estos resultados se condicen con un estudio similar sobre temperatura superficial y urbanización realizado en Santiago por Henríque et al., (2020) el cual mostró un aumento significativo de la temperatura de la superficie entre 2000 y 2019, especialmente en terrenos desnudos, alcanzando cerca de 50°C.

En contraste, en la ciudad de La Serena, los hallazgos fueron menos numerosos en comparación con Rancagua. Esto puede deberse, en parte, a la menor disponibilidad de datos de Landsat, ya que en varios puntos faltaba información de un año completo. Esta ausencia de datos se atribuye al filtro de cobertura de nubes aplicado en el código de análisis, que restringió los datos disponibles. La falta de datos completos puede haber limitado la capacidad de detectar cambios significativos en la temperatura media asociados con la urbanización en La Serena.

Es importante destacar que La Serena, una ciudad costera, y Rancagua, una ciudad del interior, presentan contextos bioclimáticos diferentes. Mientras que Rancagua, ubicada en el valle central, experimenta un clima mediterráneo con veranos secos y calurosos, La Serena, por su proximidad al océano, se beneficia de un clima más templado y regulado por la brisa marina. Estos contrastes bioclimáticos influyen en cómo cada ciudad maneja los efectos del calor urbano. Según Steward y Oke (2010), estos patrones de temperatura pueden verse alterados por factores estacionales, como la humedad del suelo, la geometría de los árboles y la cobertura de nieve, que pueden contrarrestar los efectos constantes de la geometría de los edificios o las superficies naturales. Esto sugiere que las diferencias en los hallazgos pueden estar asociadas no

solo a la urbanización, sino también a las dinámicas estacionales y bioclimáticas específicas de cada región (Steward & Oke, 2012).

También, la mayoría de los cambios significativos en la temperatura se observaron sólo durante las estaciones de verano. Este patrón estacional puede deberse a la mayor radiación solar y las condiciones climáticas propias del verano, que amplifican los efectos de las superficies urbanas en la temperatura. En invierno, los efectos de la urbanización en la temperatura son menos pronunciados, probablemente debido a la menor cantidad de radiación solar y las diferentes dinámicas térmicas de la estación.

Al analizar los cambios en las zonas climáticas en ambas ciudades, se observan patrones interesantes. En Rancagua, los puntos que cambiaron de "*low plants*" a "*compact low rise*" mostraron aumentos significativos en la temperatura media: el punto 5 aumentó 6 grados, el punto 6 aumentó 3 grados, el punto 11 aumentó 5 grados y el punto 12 aumentó 8 grados. Estos aumentos reflejan el impacto de la urbanización densa en las temperaturas locales. Por el contrario, en La Serena, los cambios de "*low plants*" a "*open low rise*" y de "*bush, scrub*" a "*open high rise*" resultaron en una disminución de la temperatura media. Específicamente, el punto 1 disminuyó 3 grados, el punto 3 (frente al mar) disminuyó 3 grados, y el punto 7 disminuyó 1 grado. La proximidad al mar y la menor densidad urbana en estos puntos pueden haber contribuido a estos resultados, sugiriendo que el efecto de enfriamiento del océano y la menor densidad de construcción pueden mitigar los aumentos de temperatura esperados con la urbanización.

Los mayores cambios se observaron utilizando exclusivamente Landsat 7, mientras que los datos de MODIS no mostraron cambios notables. Esta discrepancia resalta la importancia de la resolución espacial en la detección de cambios locales en la temperatura. Landsat, con su alta resolución espacial de 30 metros, permite capturar variaciones más sutiles en la temperatura, mientras que MODIS, con una resolución espacial de 1000 metros, se destaca por su alta frecuencia temporal (Weng et al, 2014). Mientras Landsat es más adecuado para analizar características detalladas del terreno en áreas específicas, MODIS es preferible para estudios que requieren una comprensión de la distribución espacial de la temperatura superficial sobre áreas geográficas más amplias y con mayor frecuencia temporal (Hazaymeh y Hassan, 2015).

La elección entre Landsat y MODIS depende del tipo de análisis ambiental que se quiera realizar. Aunque ambos conjuntos de datos mostraron un aumento en la temperatura media después del proceso de urbanización, Landsat 7 reveló cambios más pronunciados. Al analizar puntos específicos, se encontraron diferencias de hasta 10 grados, con MODIS siempre presentando temperaturas más altas. Esta diferencia puede deberse a la resolución espacial de los sensores y a las metodologías de medición utilizadas por cada uno. Landsat 7, con su mayor capacidad para detectar variaciones locales, presenta una imagen más detallada y precisa de los cambios de temperatura. Sin embargo, el uso de Landsat en general, en estudios que abarcan varios años y que se enfocan en los promedios de temperatura y el análisis estacional también presenta limitaciones, debido a la menor cantidad de datos.

Finalmente, dentro del marco de esta investigación, es crucial abordar estos resultados a través del concepto de Antropoceno urbano, el cual subraya cómo las actividades humanas han transformado de manera significativa los entornos urbanos. La urbanización, caracterizada por el uso de materiales de construcción que absorben y liberan calor, ha tenido un impacto notable en el clima local. Este fenómeno es evidente en Rancagua y La Serena, donde la urbanización ha generado aumentos significativos de temperatura durante el verano, exacerbando así el efecto isla de calor urbano.

Además, es relevante considerar que las dos ciudades seleccionadas para el análisis, Rancagua y La Serena no solo presentan las tasas de crecimiento histórico y proyectado más grandes dentro de las demás ciudades de estudio, sino que también comparten una característica industrial clave: ambas están influenciadas por la presencia de la industria minera. La minería, en particular, actúa como un imán económico que atrae a personas en busca de empleo y mejores condiciones de vida, lo que incrementa la demanda de infraestructura y servicios urbanos. Esto provoca un proceso de urbanización acelerada que tiene un efecto directo sobre el clima local. Según estudios, la expansión urbana en torno a polos de desarrollo económico como la minería genera una mayor presión sobre los recursos naturales y una transformación acelerada del uso del suelo (Ramírez & García, 2018).

Esta discusión resalta la necesidad urgente de implementar estrategias urbanas sostenibles que incluyan infraestructura verde, y prácticas de diseño resilientes al clima, que consideren que incluso los procesos de urbanización a menor escala pueden tener un impacto notable en el clima local. Incorporar soluciones basadas en la naturaleza y optimizar los materiales de construcción podría mitigar estos efectos adversos.

Abordar el Antropoceno urbano no solo es esencial para mitigar los efectos negativos de la urbanización y proteger el medio ambiente, sino también para mejorar la calidad de vida en las ciudades y enfrentar los desafíos del cambio climático global de manera más efectiva.

4.2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La estabilización observada tras la finalización del desarrollo urbano puede atribuirse a diversos factores, como un uso más estable del suelo y la incorporación de infraestructura verde, que contribuyen a mitigar el efecto de isla de calor. Además, materiales como el concreto y el asfalto liberan calor durante el día y se enfrían rápidamente por la noche, ayudando a regular las temperaturas extremas (Santamouris, 2015).

Es importante destacar que las diferencias bioclimáticas entre Rancagua, con un clima mediterráneo, y La Serena, influenciada por la costa, afectan significativamente los resultados. Rancagua mostró un notable aumento de temperatura estival, mientras que en La Serena, la influencia costera y la falta de datos impidieron detectar cambios significativos. Factores estacionales, como la humedad del suelo y la vegetación, también pueden modificar estos patrones (Steward & Oke, 2012). Por lo tanto, se recomienda incluir estudios de campo que consideren estas variaciones bioclimáticas y

estacionales para obtener una comprensión más detallada y precisa de cómo la urbanización impacta las temperaturas locales en diferentes contextos climáticos.

La discrepancia entre los datos de Landsat y MODIS subraya la importancia de emplear resoluciones espaciales adecuadas para captar variaciones locales en la temperatura. Si bien Landsat es útil para detectar cambios sutiles, su capacidad es limitada en estudios a largo plazo debido a la escasez de datos continuos.

Se recomienda ampliar el análisis a más ciudades para obtener una visión más representativa del impacto de la urbanización en diversos entornos. Asimismo, integrar la medición de la temperatura atmosférica con la superficial ofrecería un análisis más completo. El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) con sensores térmicos también podría mejorar la precisión de la monitorización térmica, proporcionando datos de alta resolución espacial y temporal.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, C., Olivares, R., y Orellana, A. (2018). Patrones de crecimiento urbano en la metropolización de sistemas urbanos intermedios. El caso de la conurbación La Serena-Coquimbo. In Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual (CTV).

Aliaga, B. (2022). Reflexión sobre las estructuras verdes como planificación urbana sensible al clima en las ciudades consolidadas de cara al cambio climático. Informe de práctica, Revisión Bibliográfica.

Aslam, A., y Ahmad, I. (2022). The use of local climate zones in the urban environment: A systematic review of data sources, methods, and themes. *Urban Climate*, 42, 101120.

Biblioteca del Congreso Nacional (2024). Rancagua. Reporte Comunal 2024. Reporte Comunal - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2021&idcom=6101

Biblioteca del Congreso Nacional (2024). La Serena. Reporte Comunal 2024. Reporte Comunal - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2024&idcom=4101

Brazel, J. (2017). Urban climate and physical geography: A response to Ashmore and Dodson. *The Canadian Geographer / Le Géographe Canadien*, 61, 112-116. <https://doi.org/10.1111/cag.12351>

Bukovsky, M., Gao, J., Mearns, y O'Neill, B. (2021). SSP-based land-use change scenarios: A critical uncertainty in future regional climate change projections. *Earth's Future*, 9(3), e2020EF001782.

Bourscheidt, V. (2017). Análise de tendência da temperatura de superfície a partir de imagens Landsat 5: contribuições da plataforma Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 9(12), 1336.

Duarte, C., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo Buendía, M., y Valladares, F. (2006). *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid: CSIC.

Duque, I., y Montoya, J. (2021). Cambio climático y urbanización. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 274-279.

Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Takahashi, K., y Masui, T. (2018). Gridded emissions and land-use data for 2005–2100 under diverse socioeconomic and climate mitigation scenarios. *Scientific Data*, 5(1), 1-13.

Gao, J., y Bukovsky, M. S. (2023). Urban land patterns can moderate population exposures to climate extremes over the 21st century. *Nature Communications*, 14(1), 6536.

Hanberry, B. (2022). Global population densities, climate change, and the maximum monthly temperature threshold as a potential tipping point for high urban densities. *Ecological Indicators*, 135, 108512.

Hazaymeh, K., y Hassan, Q. (2015). Fusion of MODIS and Landsat-8 surface temperature images: A new approach. *PLoS One*, 10(3), e0117755.

Henrique, F., Romero, H., y Ferreira, D. (2020). Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (77), 191-210. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022020000300191>

Henríquez, C., Qüense, J., Contreras, P., Guerrero, N., Smith, P., y González, F. (2020). Informe Proyecto ARClím: Ciudades. Centro de Cambio Global UC, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y CEDEUS coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago.

Idris, M. A. A. B., Hashim, N., y Khalid, N. (2023). Analyzing the impact of land surface temperature due to urbanization using Landsat 8 satellite image. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1240, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1240/1/012014>

Irizarri, D. (2020). Suburbanización de ciudades chilenas en proceso de metropolización: tensiones en la planificación y la gobernanza de la conurbación Rancagua-Machalí. (Tesis de postgrado). Universidad Católica de Chile.

Luna, N., y Medina, J. (2021). Implementación y evaluación del cambio de temperatura por erupciones volcánicas usando Google Earth Engine: Volcán Galeras Nariño-Colombia. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E41), 437-447.

Montes, C., & Gutiérrez, M. D. (2015). Ciudades resilientes en el antropoceno: mito o realidad. *Ciudad Y Territorio Estudios Territoriales*, 9-22.

Orellana, A., Díaz, M., y Fierro, M. (2016). De ciudad mediterránea a metrópolis costera, el caso de Gran La Serena. *Urbano*, 30-43.

Perilla, G., y Mas, J. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones geográficas*, (101), e59929. Epub 02 de octubre de 2020. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>

Parastatidis, D., Mitraka, Z., Chrysoulakis, N., y Abrams, M. (2017). Online Global Land Surface Temperature Estimation from Landsat. *Remote Sens.* 2017, 9, 1208.

Prugh, T., y Renner, M. (2016). Ciudades y emisiones de gases de efecto invernadero: la dimensión del reto. *Gardner, G*, 127-142.

Sánchez, J. (2021). El debate sobre el Antropoceno como oportunidad para repensar la Geografía y su enseñanza. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 60(3), 297-315.

Sanchirico, V. (2012). Evolución de la mancha urbana de Rancagua desde 1960 a la actualidad.

Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., y Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, 8(2008), 71-84.

Sarricolea, P., Ossandon, M., y Meseguer-Ruiz, O. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 66-73.

Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 512, 582-598.

Smith, P., Peralta, O., Sarricolea, P., Thomas, F., y Mesengue, O. (2023). Climate-sensitive planning. Opportunities through the study of LCZs in Chile. *Building and Environment*, 242, 110444

Steensen, B. M., Marelle, L., Hodnebrog, Ø., y Myhre, G. (2022). Future urban heat island influence on precipitation. *Climate Dynamics*, 58(11-12), 3393-3403.

Stewart I, y Oke T. (2012). Local climate zones' for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93: 1879–1900.

Stewart, I. D., y Oke, T. R. (2010). Thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites. In Ninth symposium on urban environment, Keystone, CO (pp. 2-6).

Stewart, I., Oke, T., y Krayenhoff, E. (2013). Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International journal of climatology*, 34(4), 1062-1080.

Su, R., Yang, C., Xu, Z., Luo, T., Yang, L., Liu, L., y Wang, C. (2024). Comparing Characteristics of the Urban Thermal Environment Based on the Local Climate Zone in Three Chinese Metropolises. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(2), 61.

Torrent, H. (2004). Patrimonio territorial y arquitectónico: El Plan Serena. *Urbano*, 7(10), 93-99.

Trischler, H. (2017). El Antropoceno, ¿un concepto geológico o cultural, o ambos? *Desacatos*, (54), 40-57.

Uriarte, A. (2003). Historia del clima de la Tierra. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

Veliz, G. (1990). Conurbación La Serena-Coquimbo: tendencias en el uso del suelo. *Revista Geográfica*, 219-258.

Weng, Q., Fu, P., y Gao, F. (2014). Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote sensing of environment*, 145, 55-67.

Yu, S., Zhu, Z., Zhang, Z., Cai, S., Liu, F., Zhao, X., Wang, X., y Hu, S. (2024). Land Surface Temperature Changes in Different Urbanization Increments in China since 2000. *Land*, 13(4), 417.

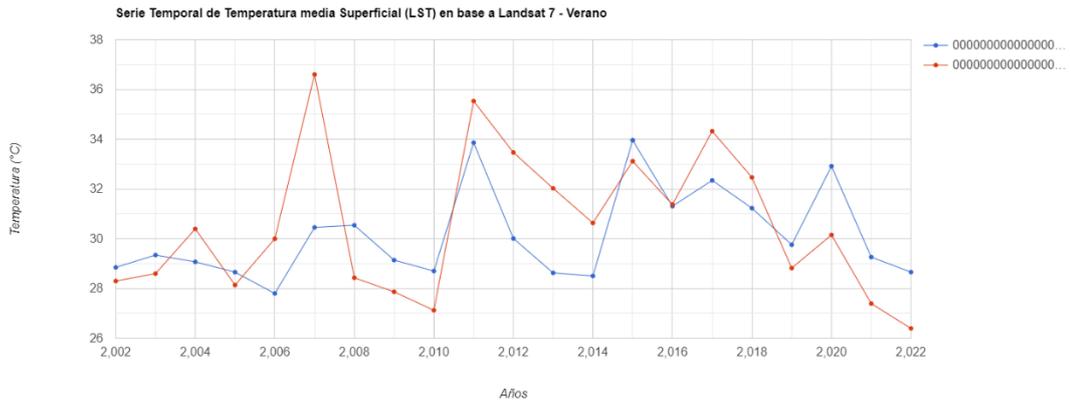
Zamora, M. E., Huerta, A. H., Maqueo, O. P., Badillo, G. B., & Bernal, S. I. (2016). Cambio global: el Antropoceno. *CIENCIA ergo-sum*, 23(1), 67-75.

Zwolska, A., Pórolniczak, M., & Kolendowicz, L. (2024). Urban growth's implications on land surface temperature in a medium-sized European city based on LCZ classification. *Scientific Reports*, 14(1), 8308.

ANEXOS

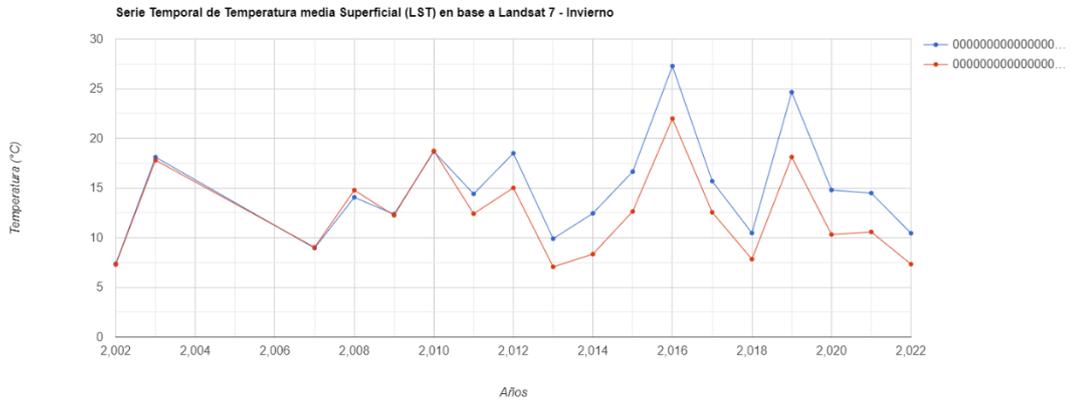
Anexo A: Gráficos en base a Landsat 7 para todos los puntos en Rancagua

Anexo 1: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



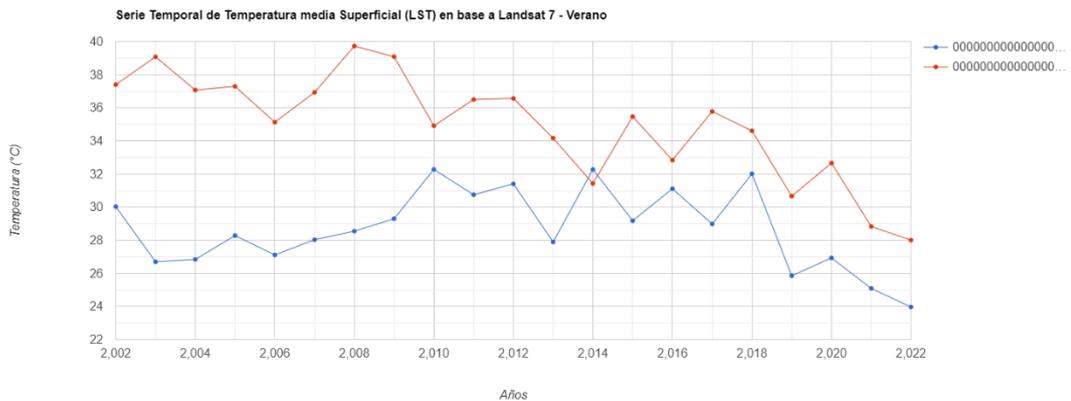
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 1 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



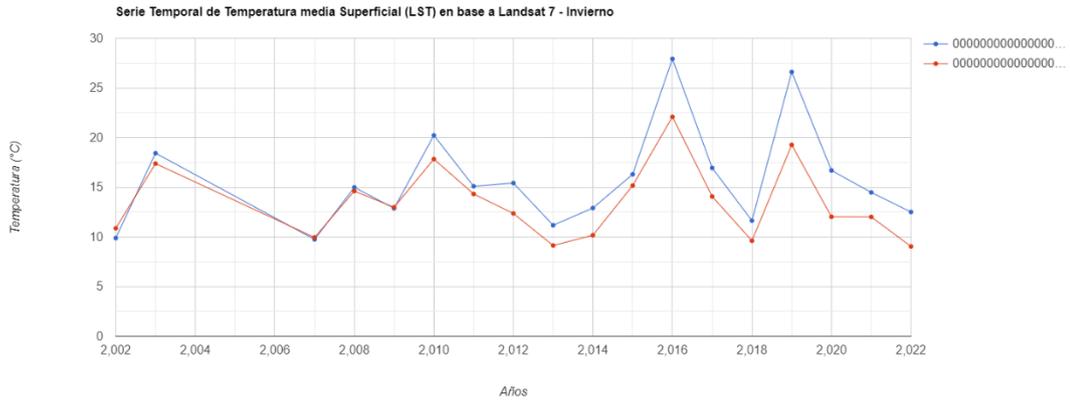
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



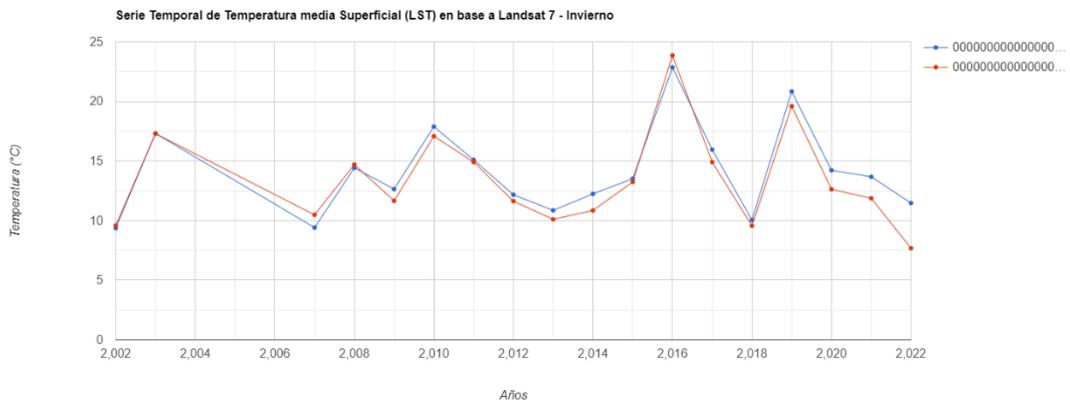
Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



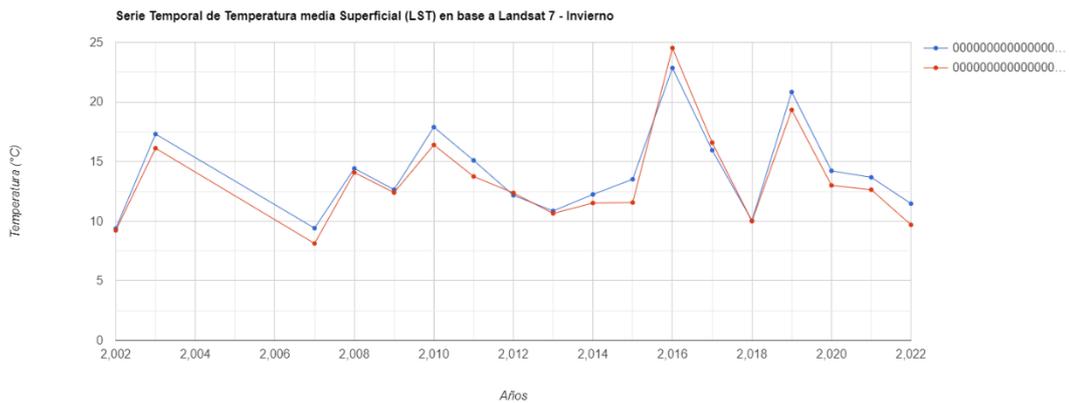
Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 3 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



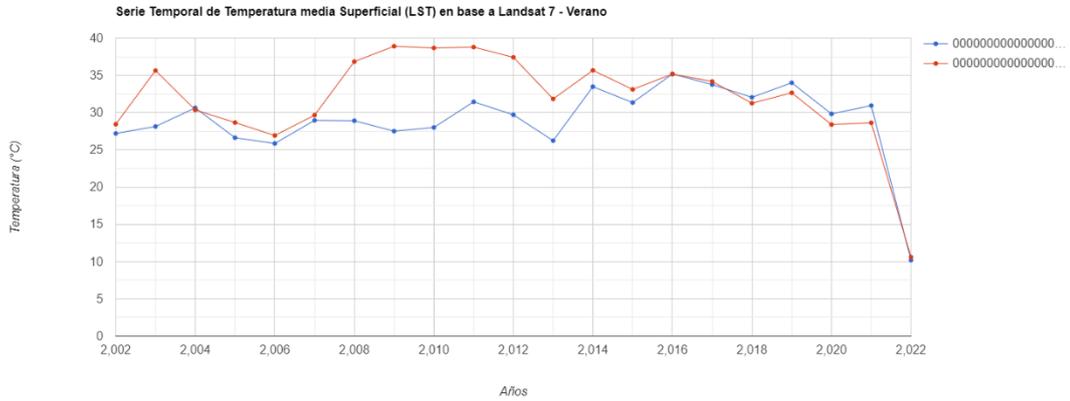
Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 4 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



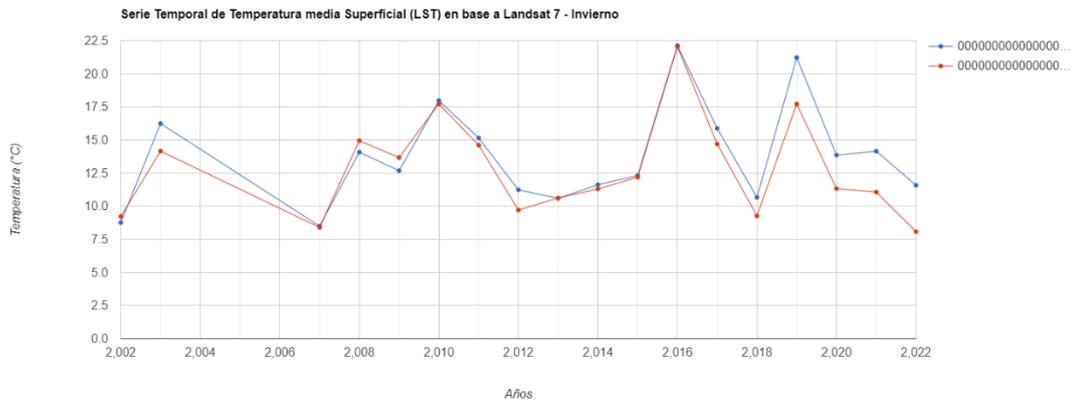
Fuente: Elaboración propia

Anexo 7: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 5 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



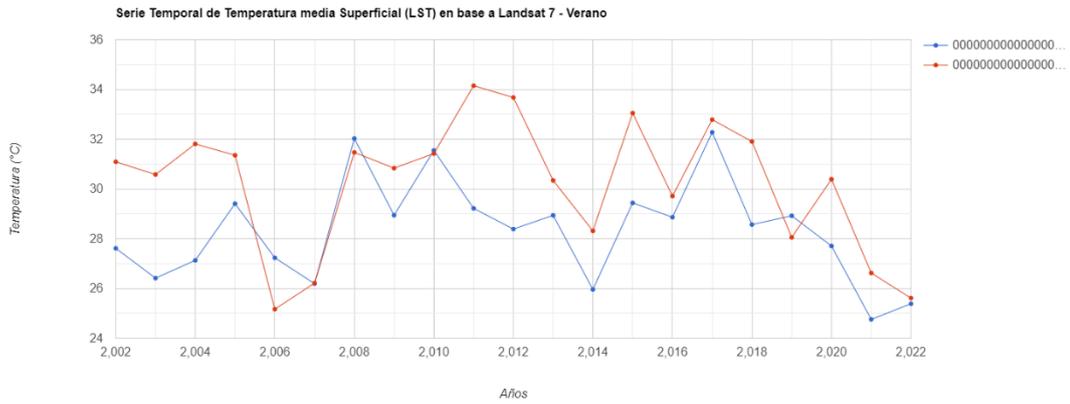
Fuente: Elaboración propia

Anexo 8: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 5 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7-



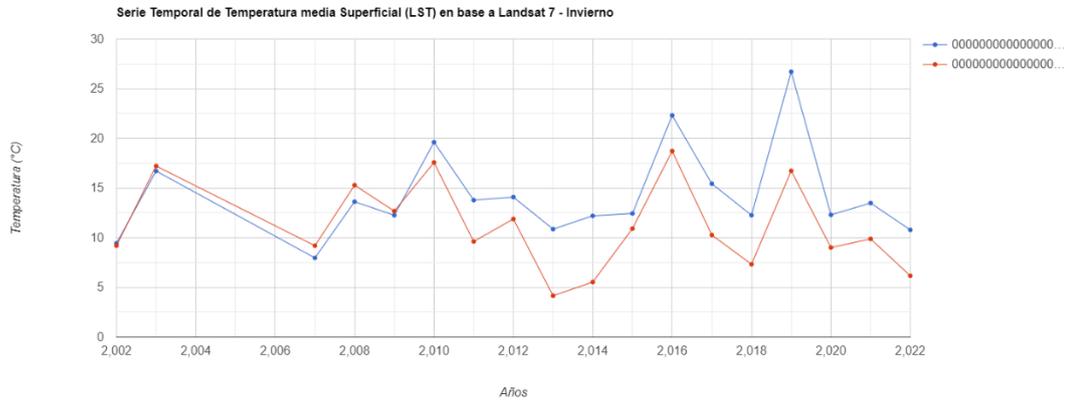
Fuente: Elaboración propia

Anexo 9: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



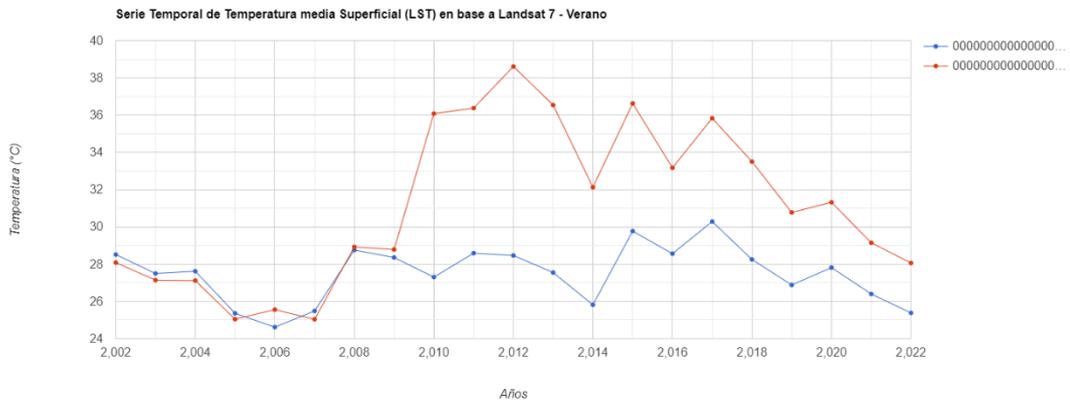
Fuente: Elaboración propia

Anexo 10: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



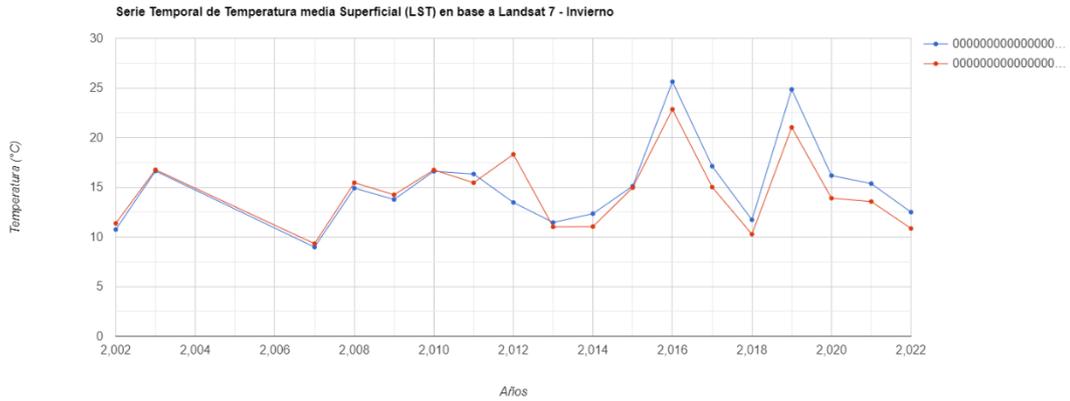
Fuente: Elaboración propia

Anexo 11: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 7 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



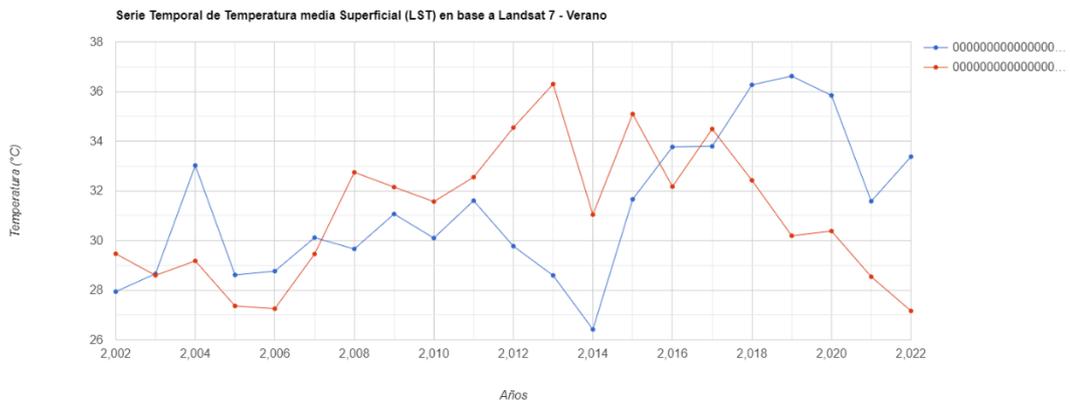
Fuente: Elaboración propia

Anexo 12: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 7 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7.



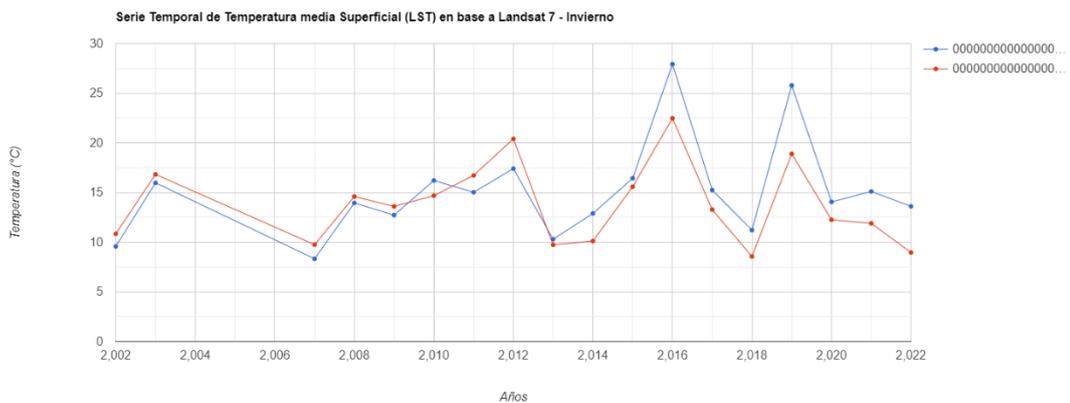
Fuente: Elaboración propia

Anexo 13: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 8 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



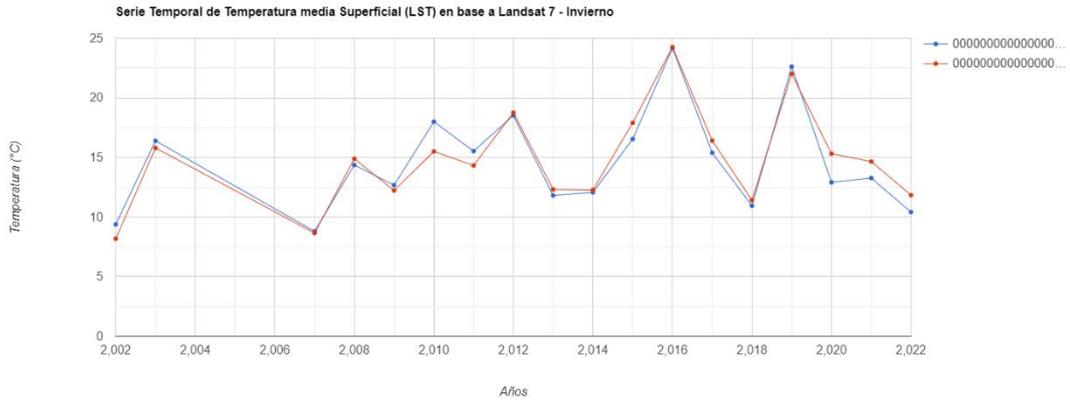
Fuente: Elaboración propia

Anexo 14: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 8 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



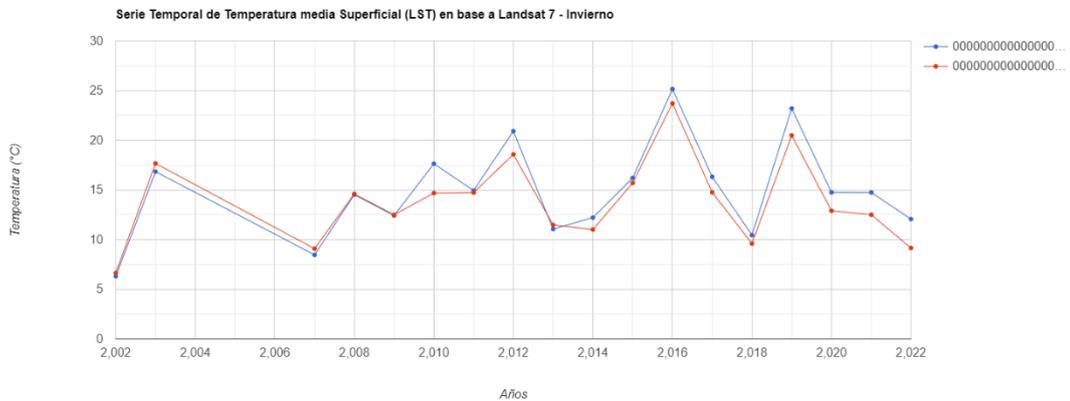
Fuente: Elaboración propia

Anexo 14: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 9 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



Fuente: Elaboración propia

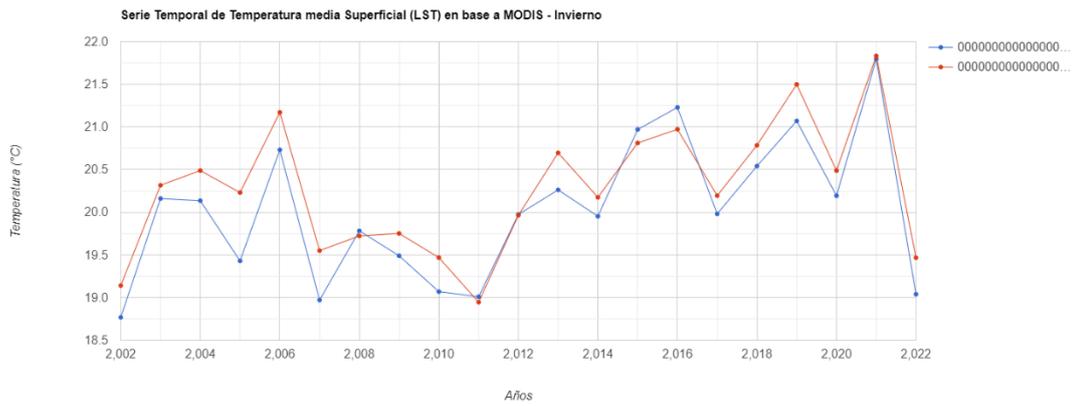
Anexo 15: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 10 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



Fuente: Elaboración propia

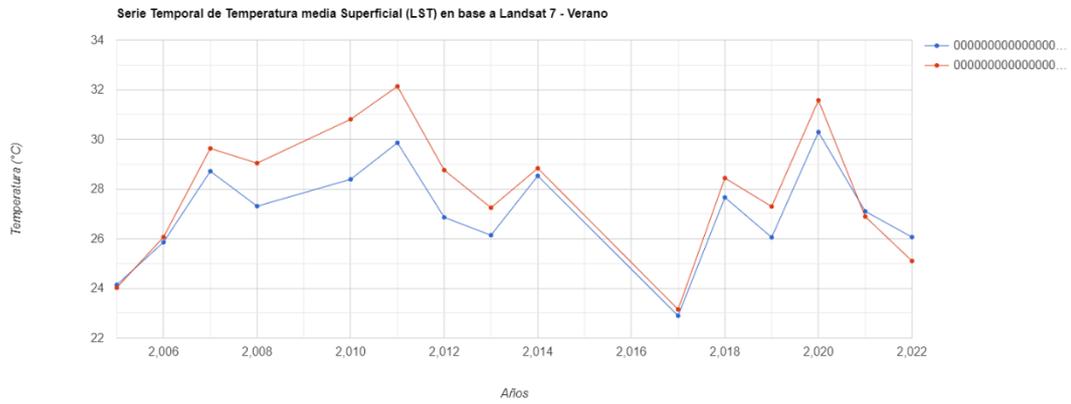
Anexo B: Gráficos en base a Landsat 7 para todos los puntos en La Serena

Anexo 16: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



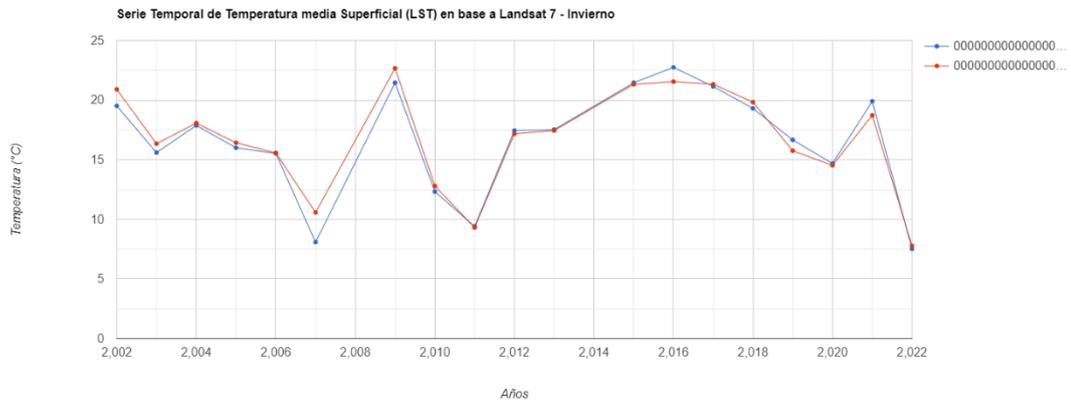
Fuente: Elaboración propia

Anexo 17: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



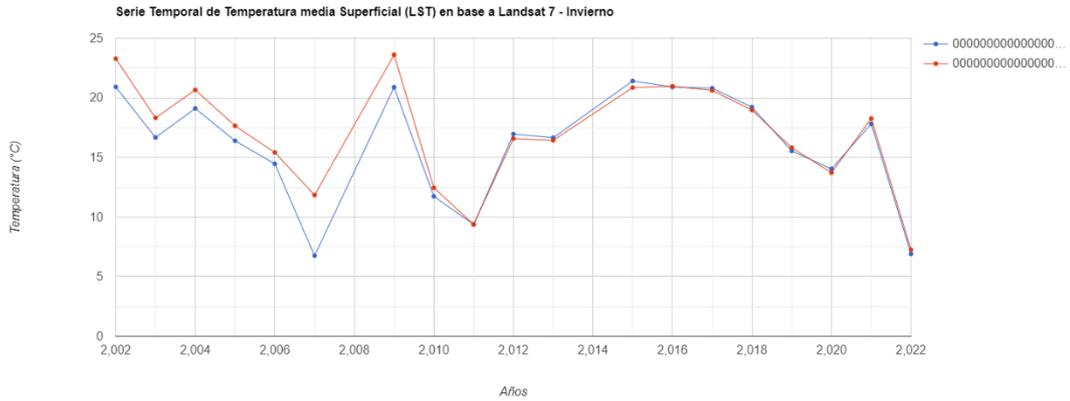
Fuente: Elaboración propia

Anexo 18: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



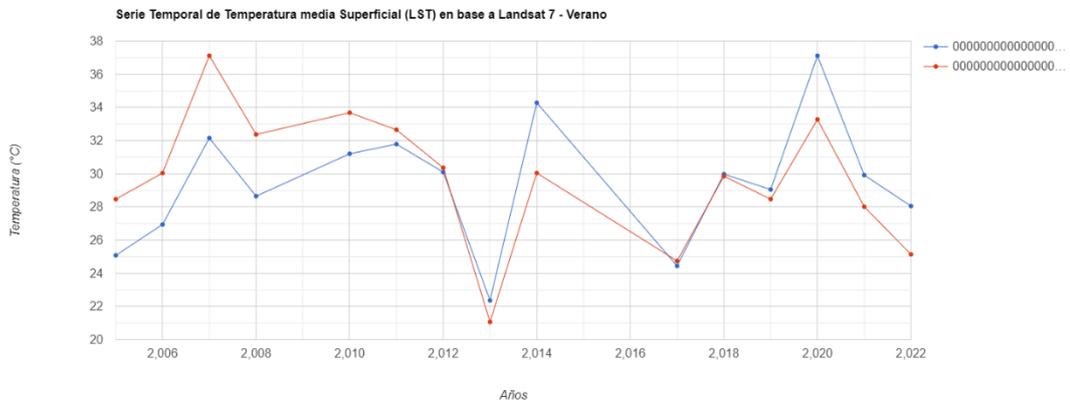
Fuente: Elaboración propia

Anexo 19: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 3 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



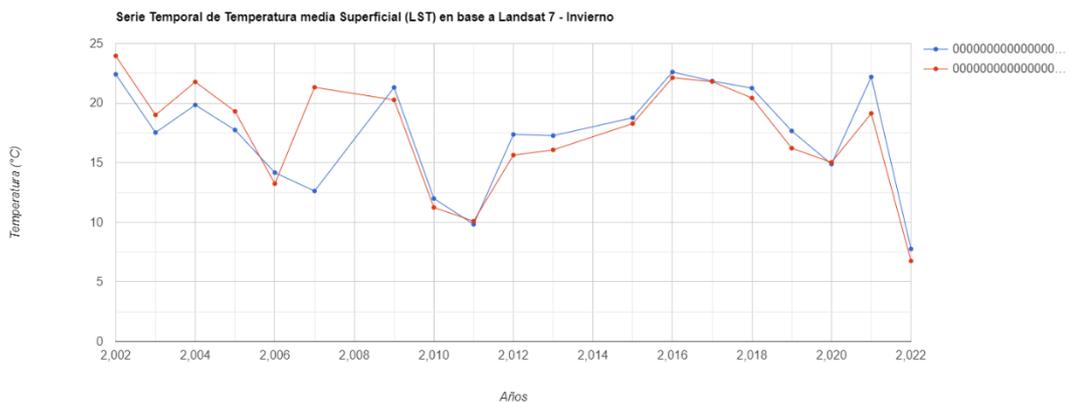
Fuente: Elaboración propia

Anexo 20: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 4 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



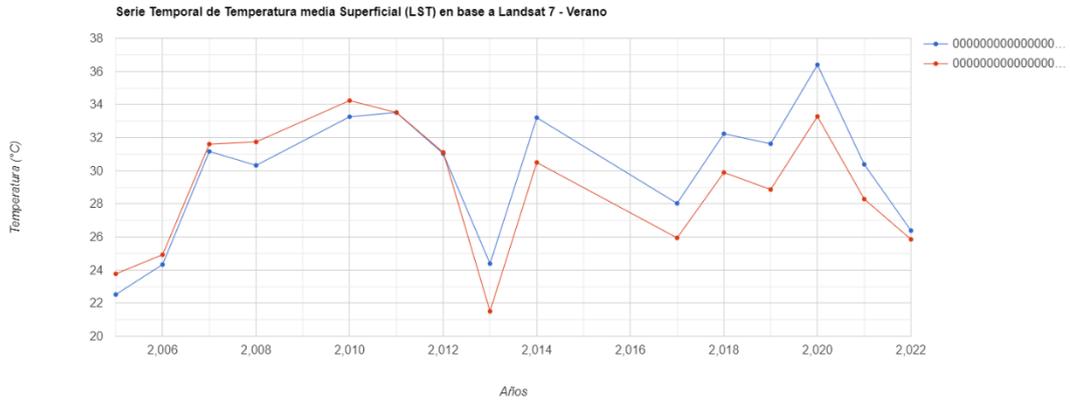
Fuente: Elaboración propia

Anexo 21: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno 2002-2022) del Punto 4 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



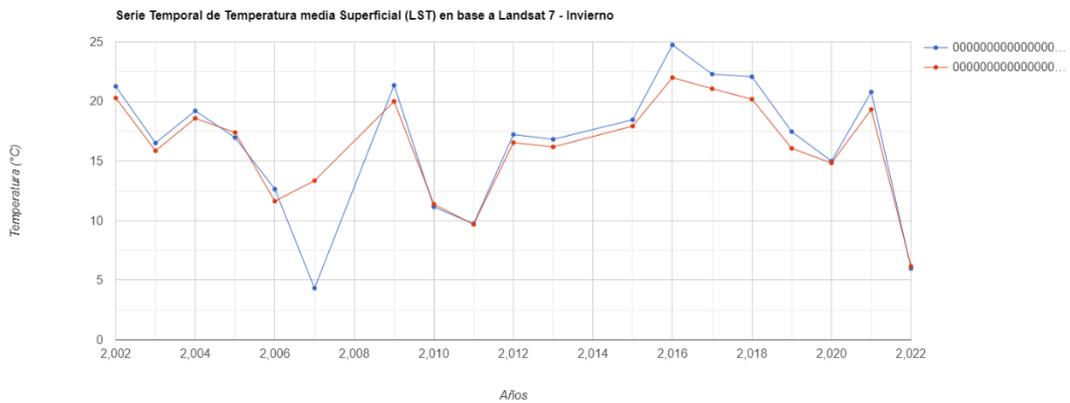
Fuente: Elaboración propia

Anexo 22: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 5 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



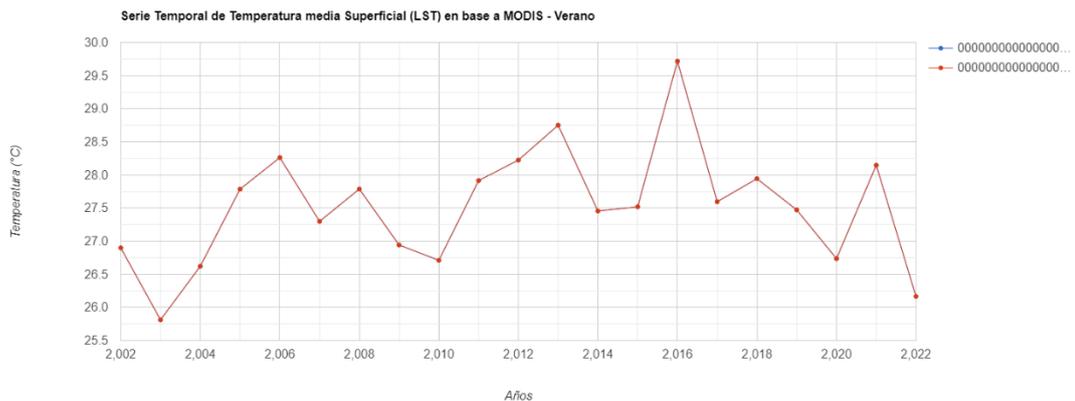
Fuente: Elaboración propia

Anexo 23: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno 2002-2022) del Punto 5 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



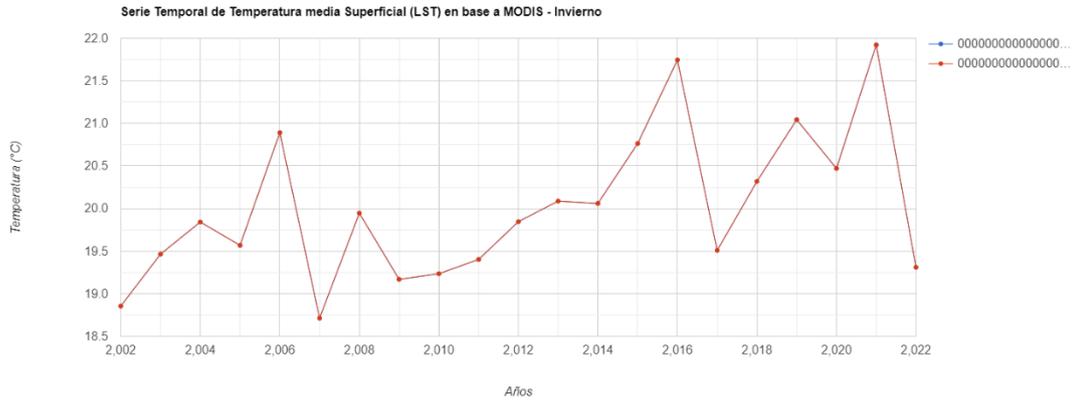
Fuente: Elaboración propia

Anexo 24: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 6 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



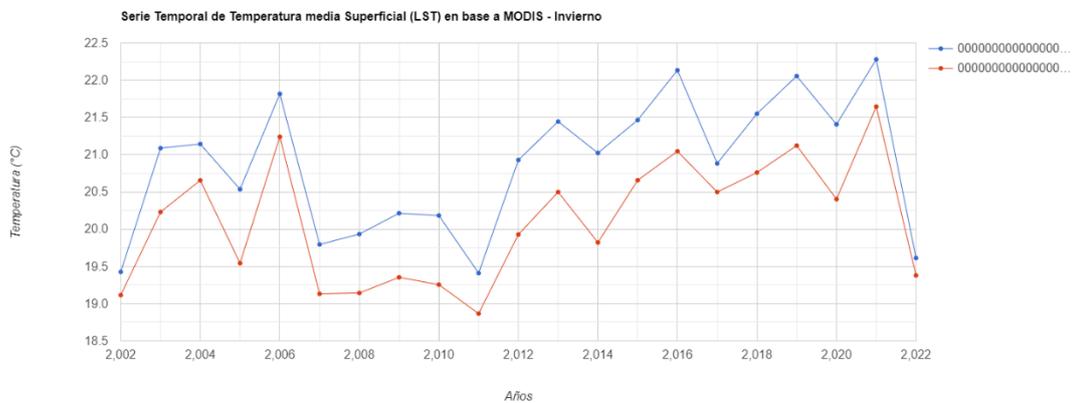
Fuente: Elaboración propia

Anexo 25: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 6 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



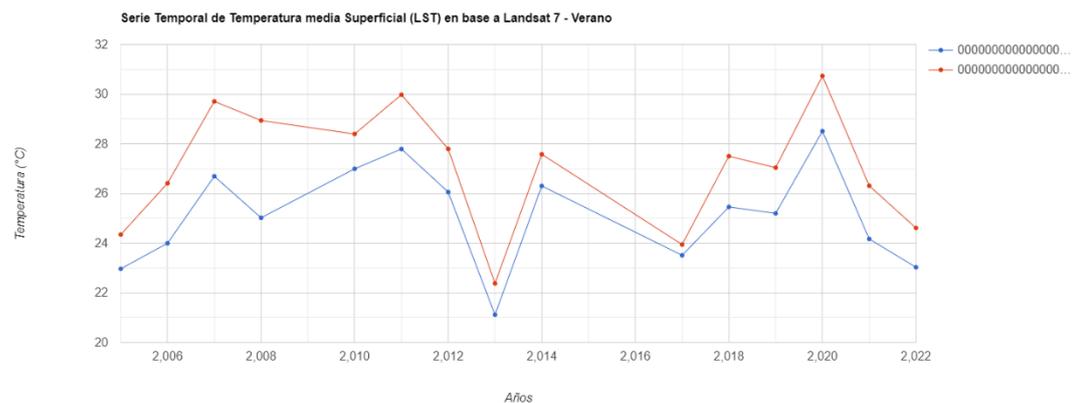
Fuente: Elaboración propia

Anexo 26: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 7 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



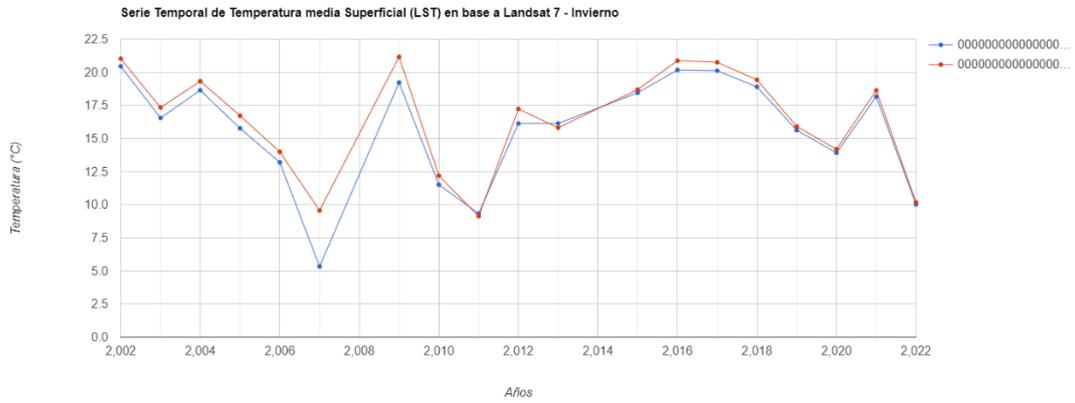
Fuente: Elaboración propia

Anexo 27: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 8 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



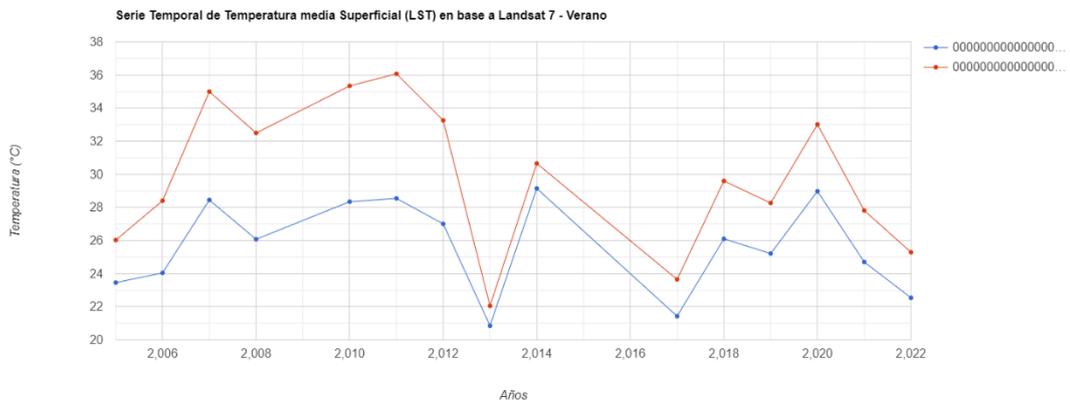
Fuente: Elaboración propia

Anexo 28: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno 2002-2022) del Punto 8 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



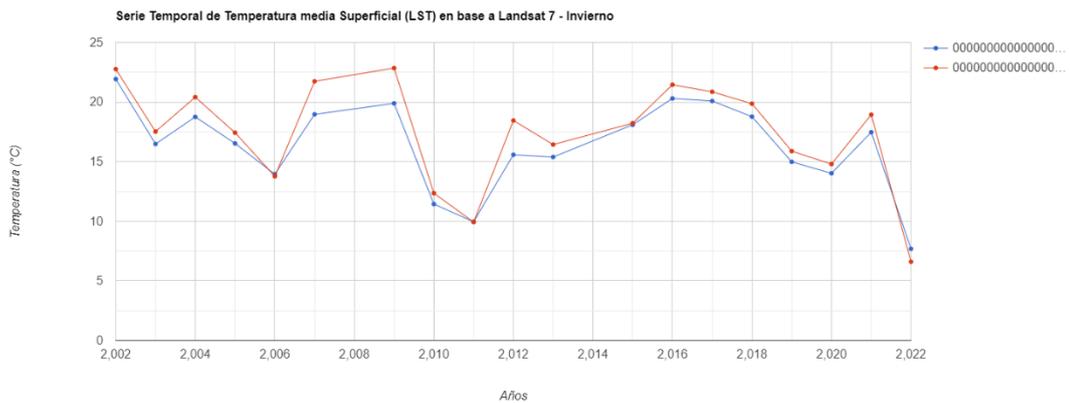
Fuente: Elaboración propia

Anexo 29: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 9 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



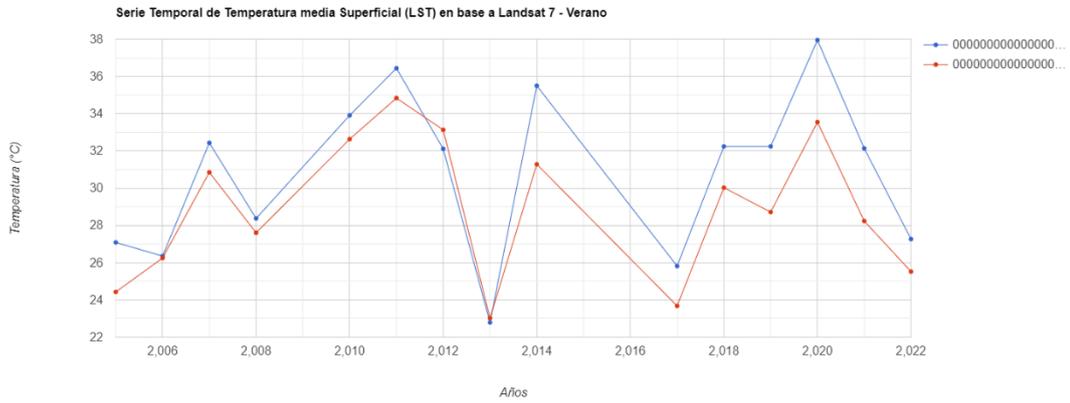
Fuente: Elaboración propia

Anexo 30: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 9 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



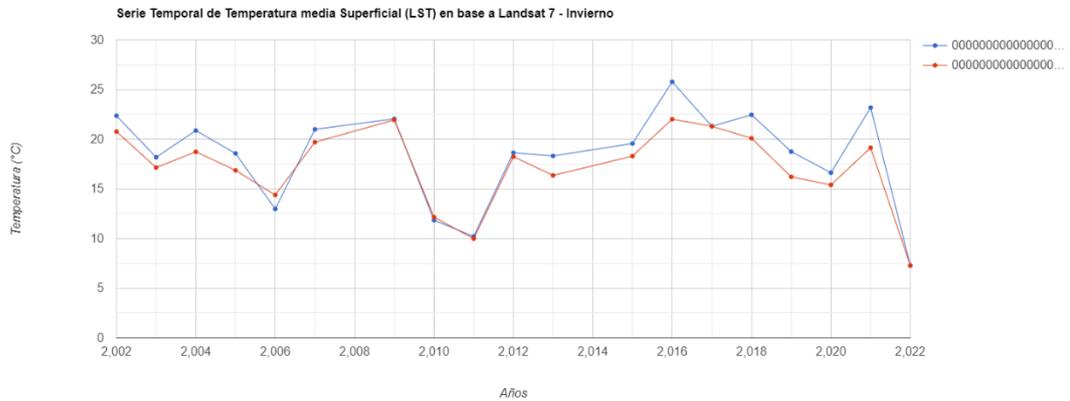
Fuente: Elaboración propia

Anexo 31: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 10 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



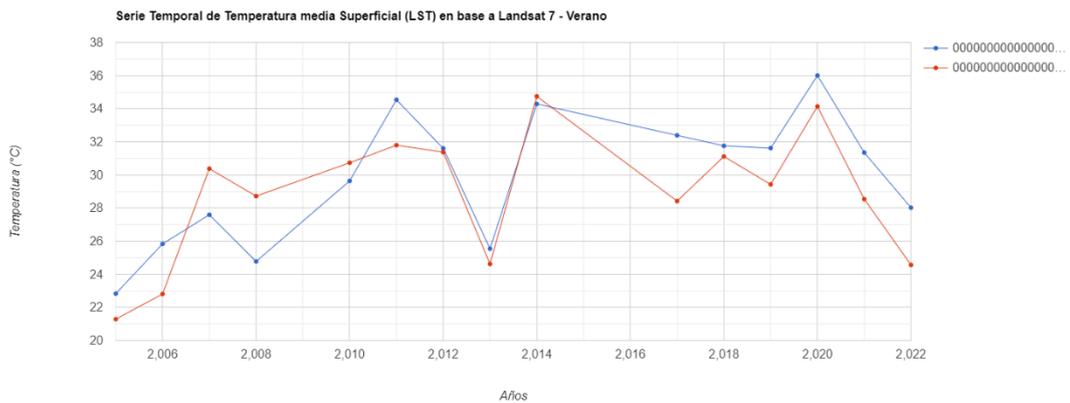
Fuente: Elaboración propia

Anexo 32: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 10 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



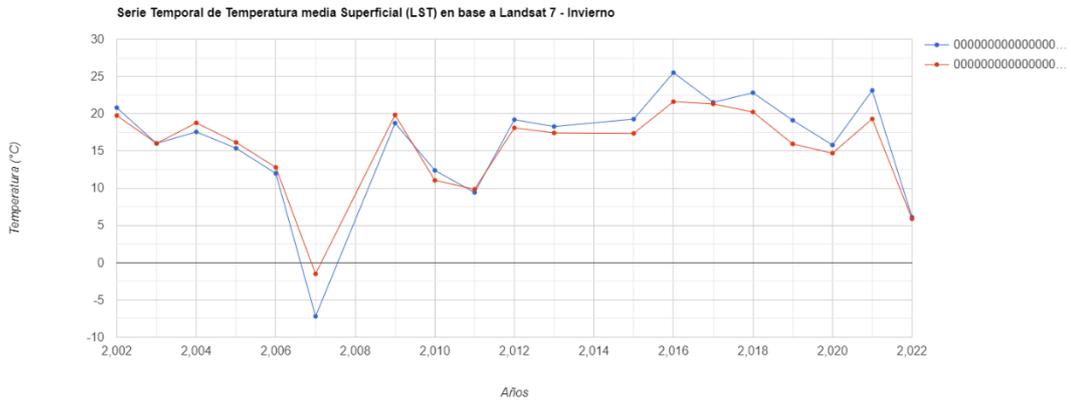
Fuente: Elaboración propia

Anexo 33: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 11 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



Fuente: Elaboración propia

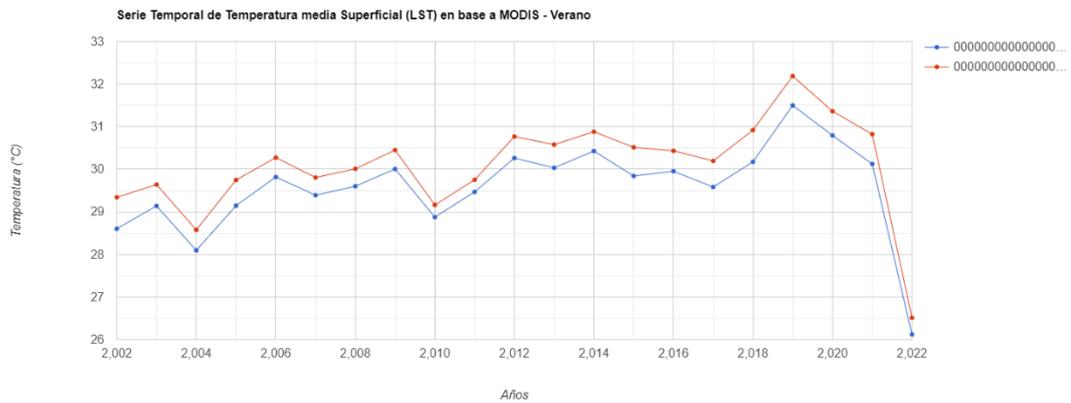
Anexo 34: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 11 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en Landsat 7



Fuente: Elaboración propia

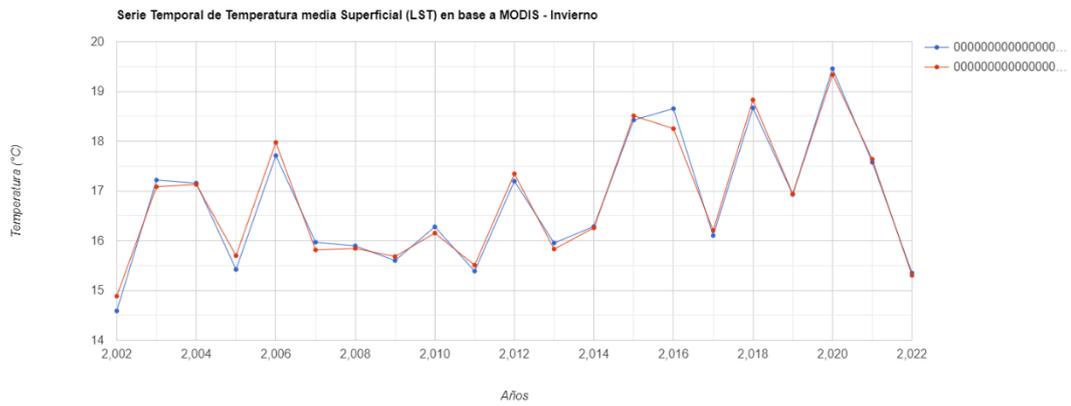
Anexo C: Gráficos Estacionales MODIS para Todos los Puntos en Rancagua

Anexo 35: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 1 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



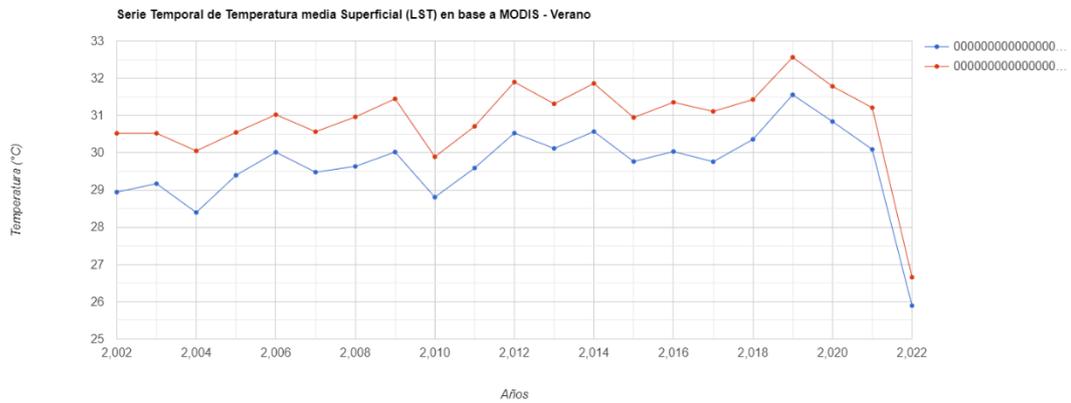
Fuente: Elaboración propia

Anexo 36: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 1 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



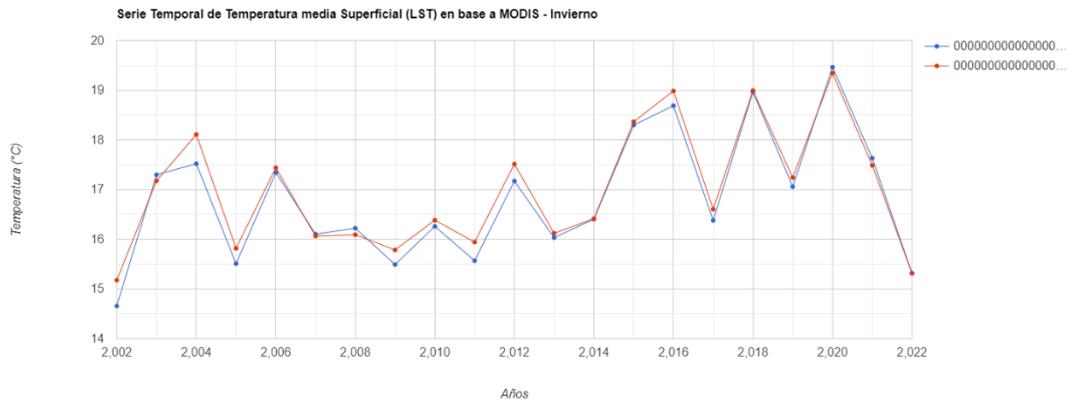
Fuente: Elaboración propia

Anexo 37: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



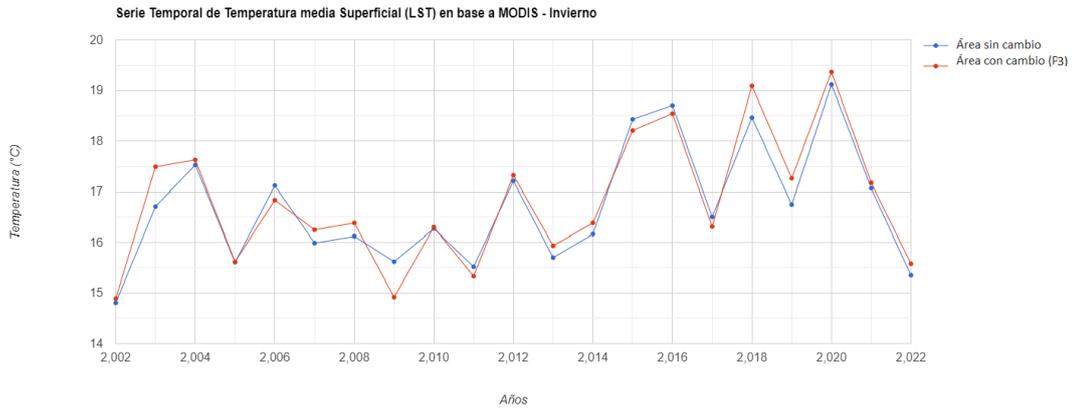
Fuente: Elaboración propia

Anexo 38: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



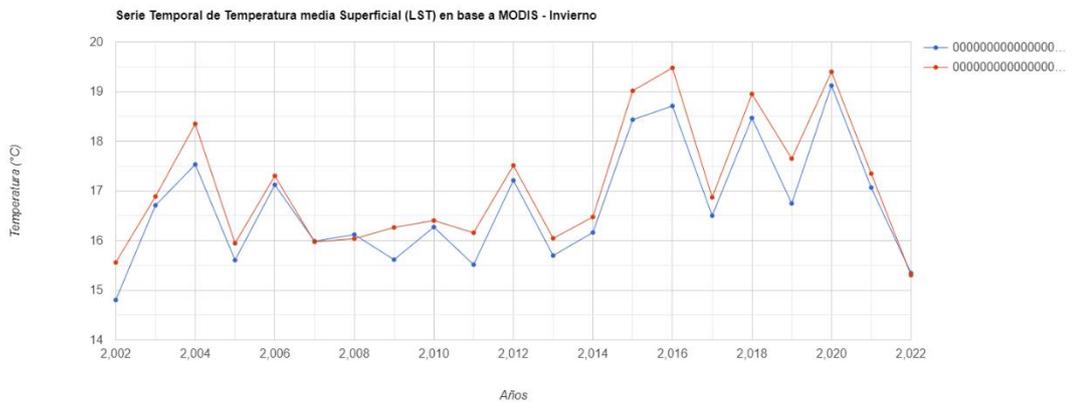
Fuente: Elaboración propia

Anexo 39: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 3 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



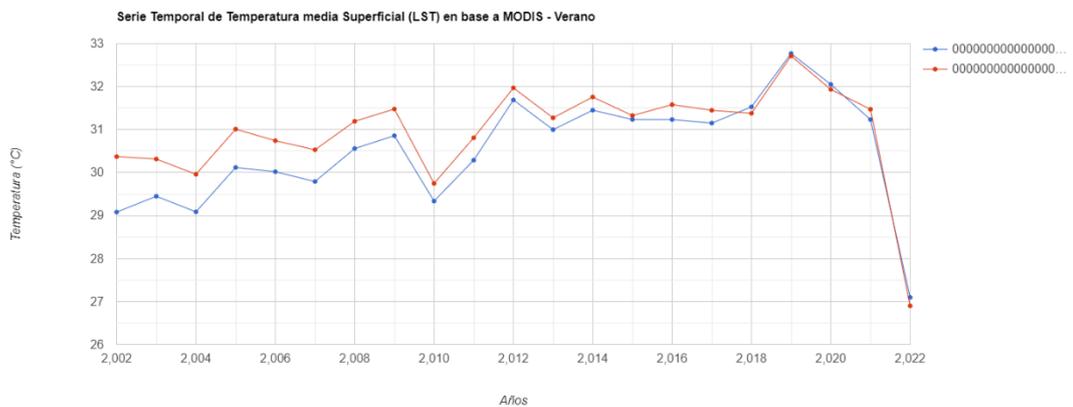
Fuente: Elaboración propia

Anexo 40: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 4 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



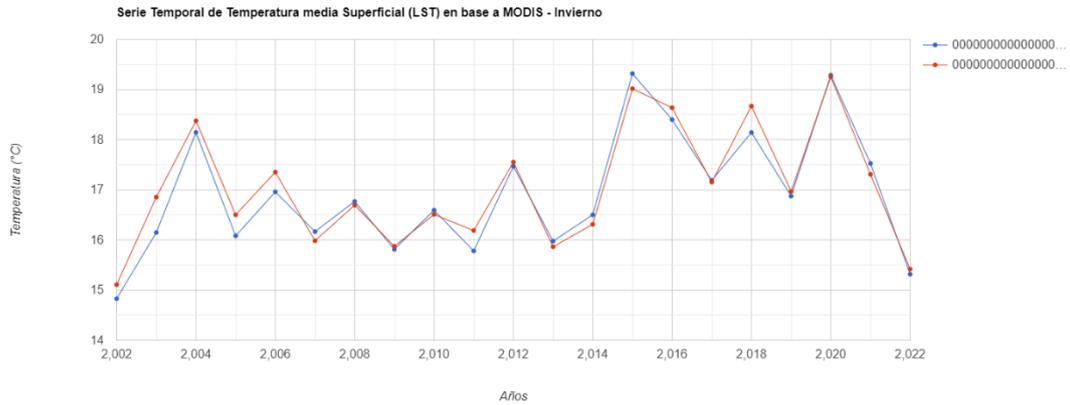
Fuente: Elaboración propia

Anexo 41: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 5 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



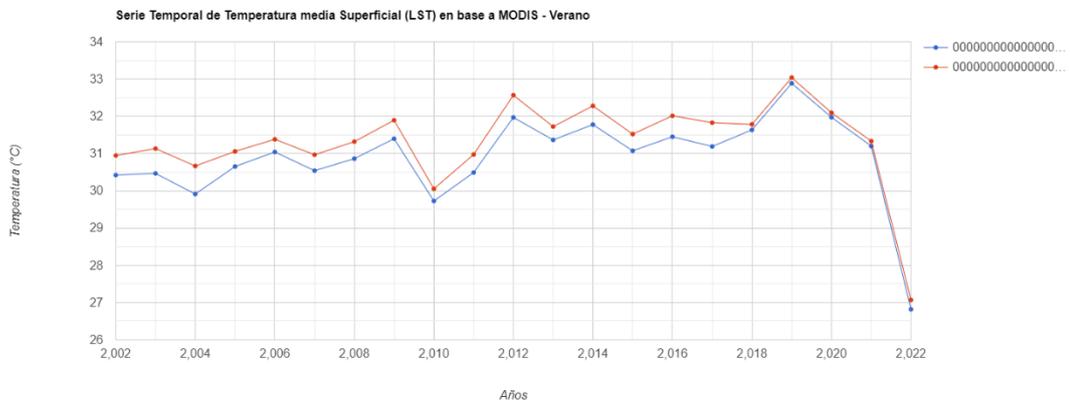
Fuente: Elaboración propia

Anexo 42: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 5 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



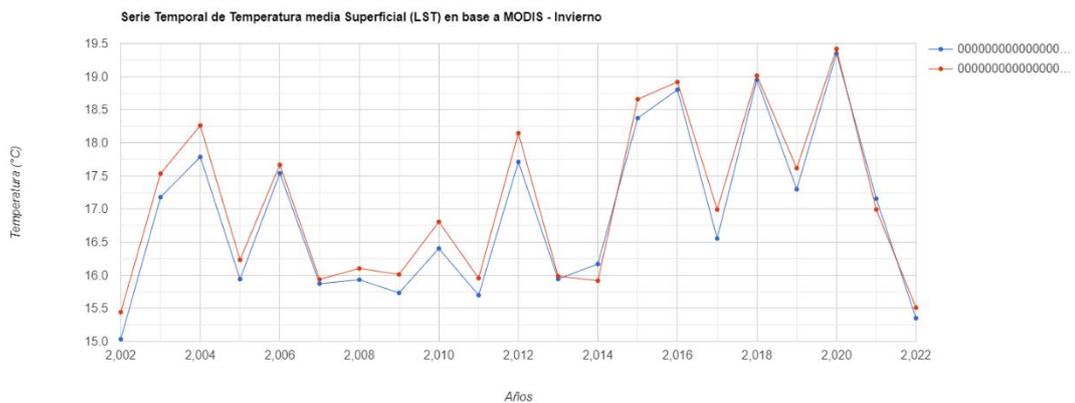
Fuente: Elaboración propia

Anexo 43: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



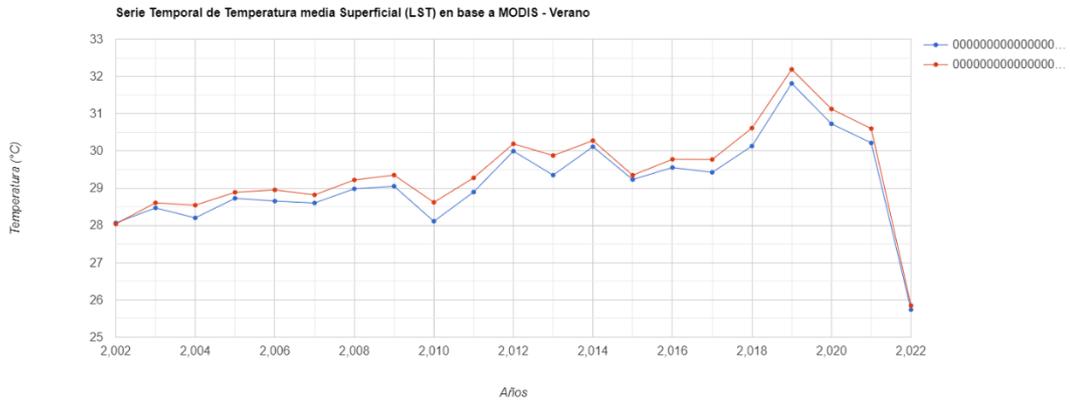
Fuente: Elaboración propia

Anexo 44: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 6 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



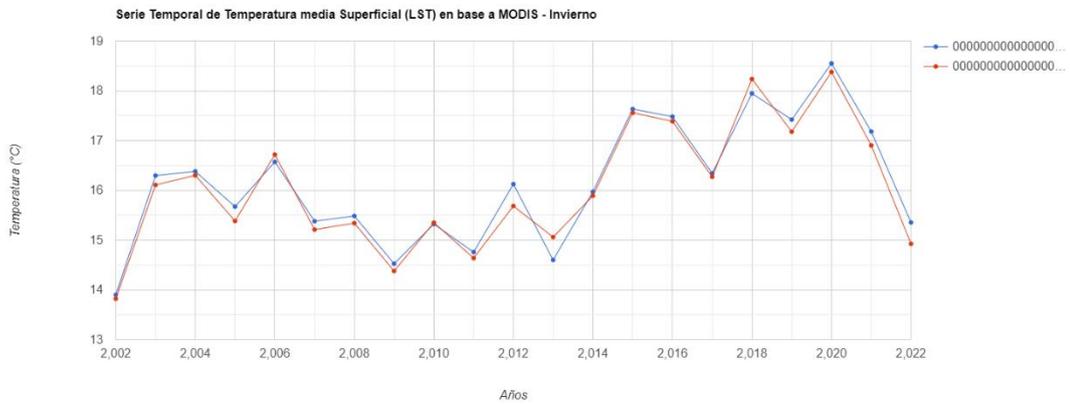
Fuente: Elaboración propia

Anexo 45: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 7 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



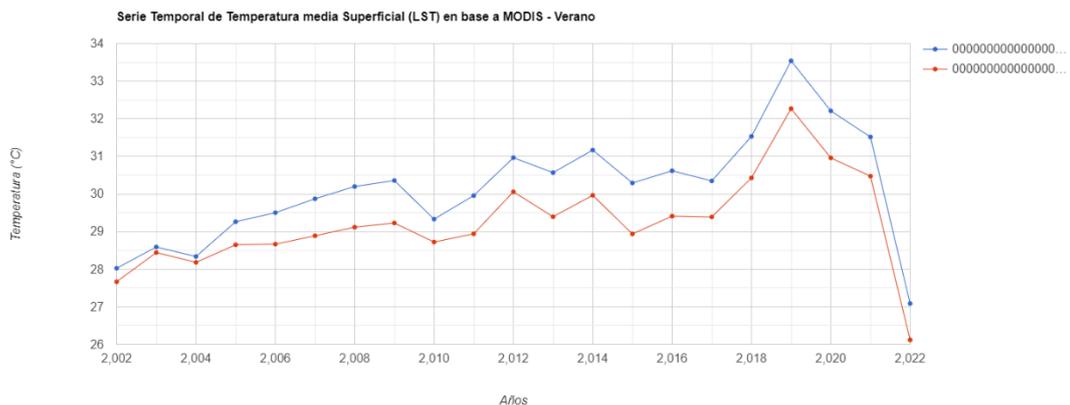
Fuente: Elaboración propia

Anexo 46: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 7 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



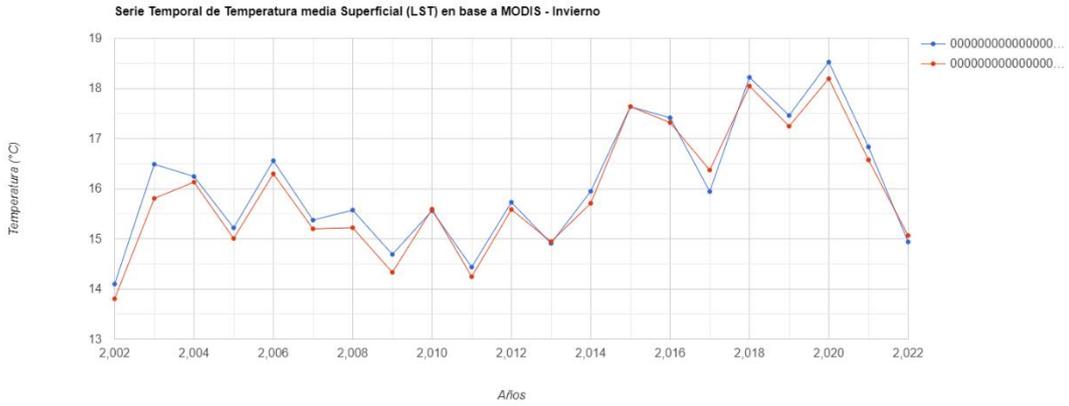
Fuente: Elaboración propia

Anexo 47: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 8 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



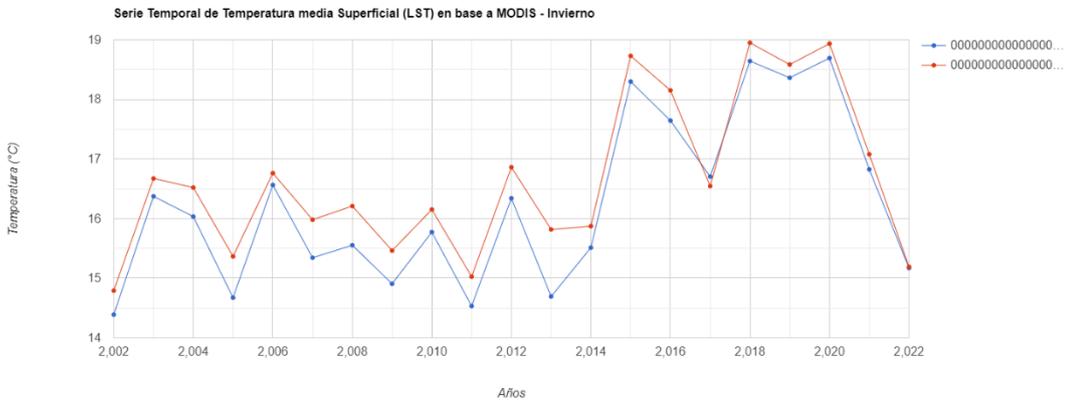
Fuente: Elaboración propia

Anexo 48: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 8 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



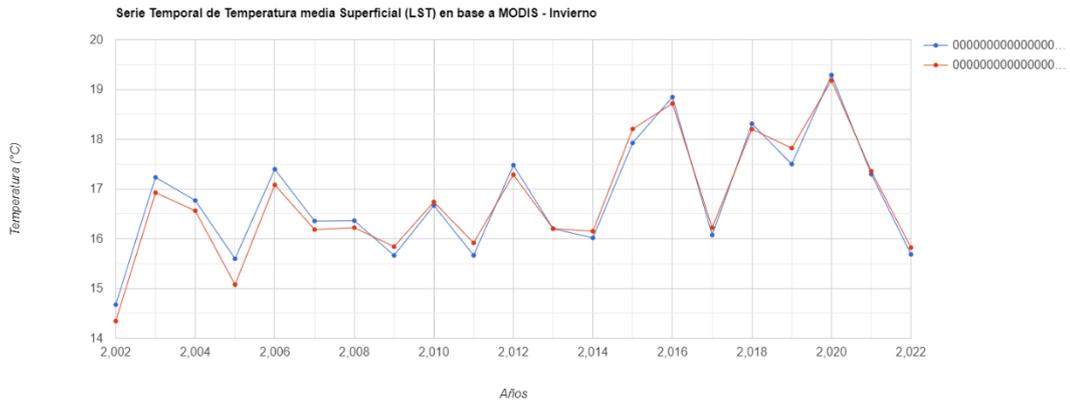
Fuente: Elaboración propia

Anexo 49: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 9 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

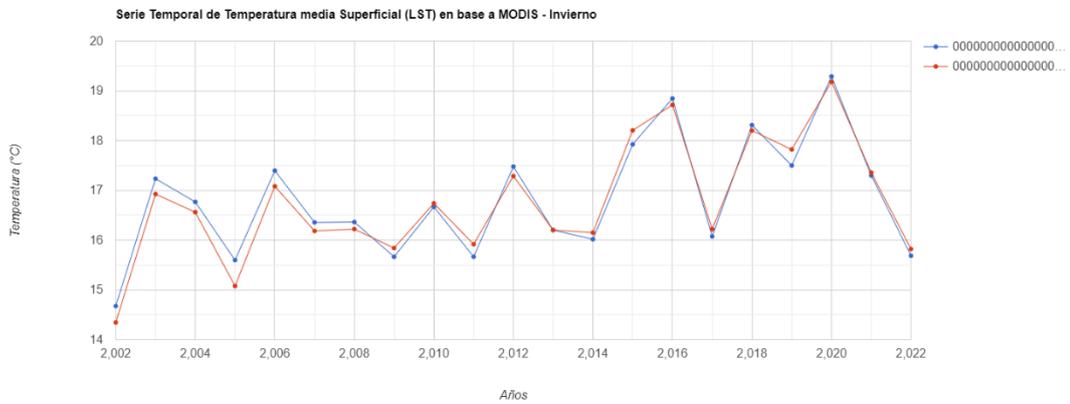
Anexo 50: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 9 en Rancagua: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

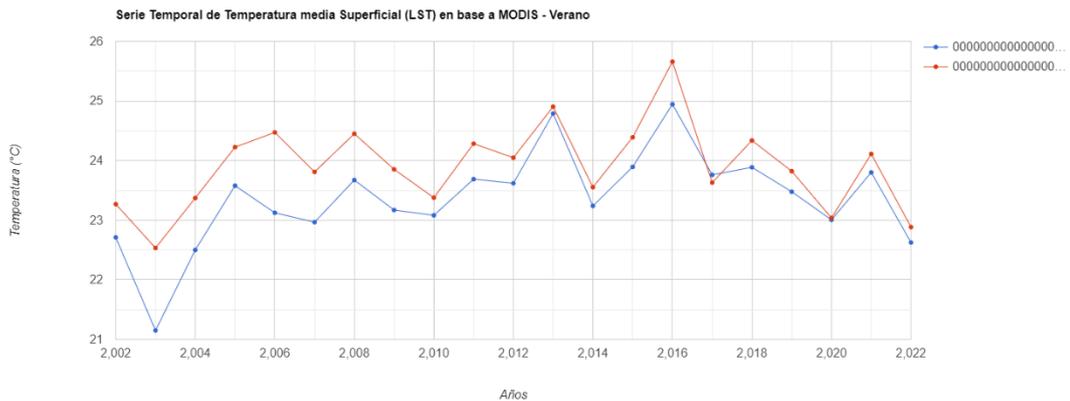
Anexos D: Gráficos Estacionales MODIS para Todos los Puntos en La Serena

Anexo 51: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 1 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



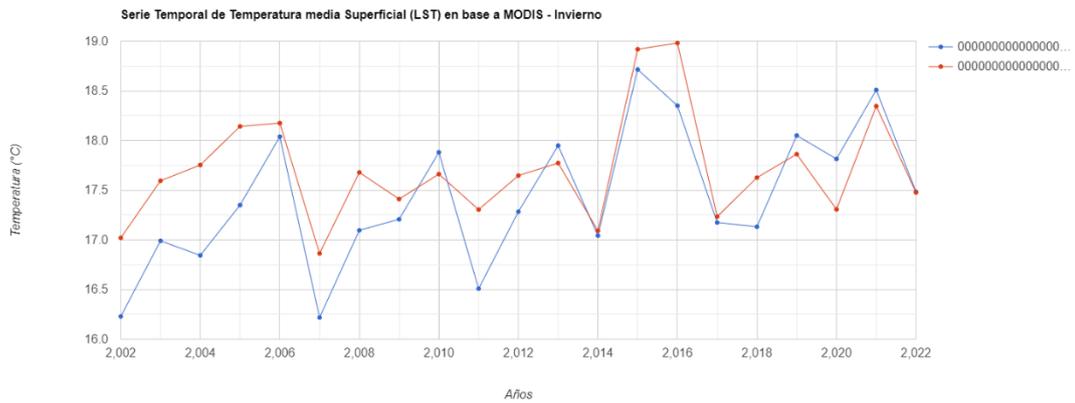
Fuente: Elaboración propia

Anexo 52: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



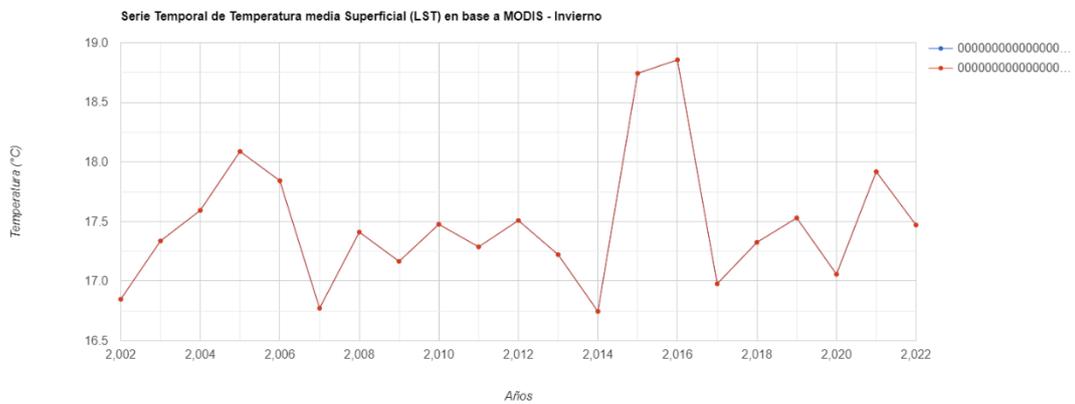
Fuente: Elaboración propia

Anexo 53: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 2 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



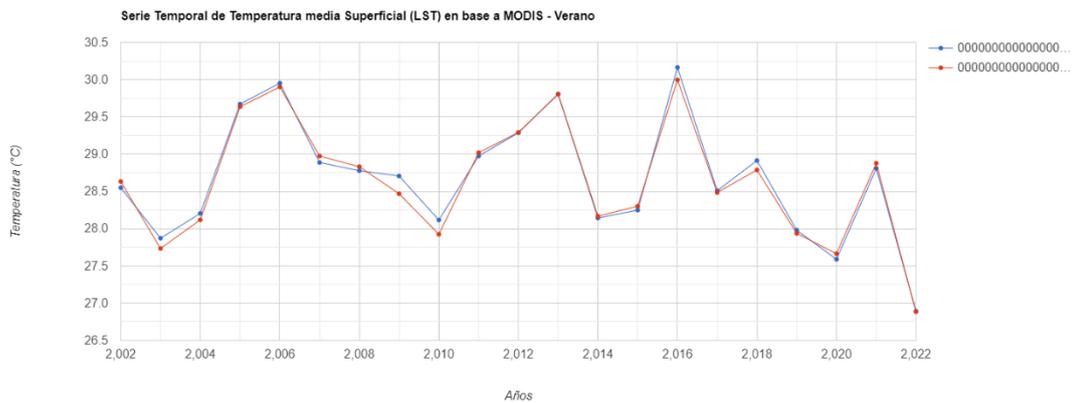
Fuente: Elaboración propia

Anexo 54: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 3 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



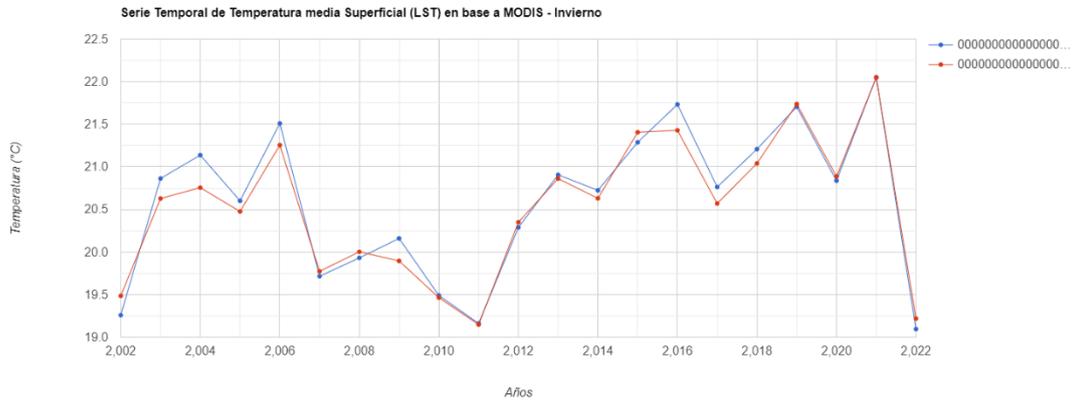
Fuente: Elaboración propia

Anexo 55: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 4 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



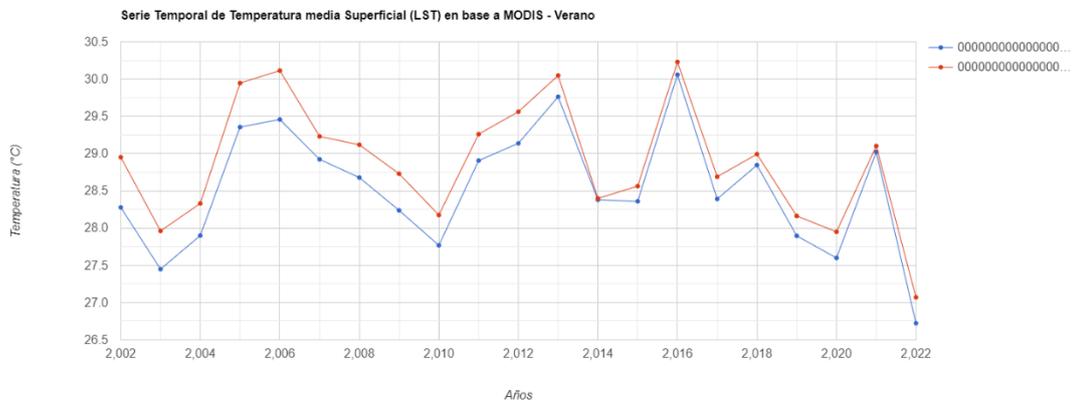
Fuente: Elaboración propia

Anexo 56: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 4 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



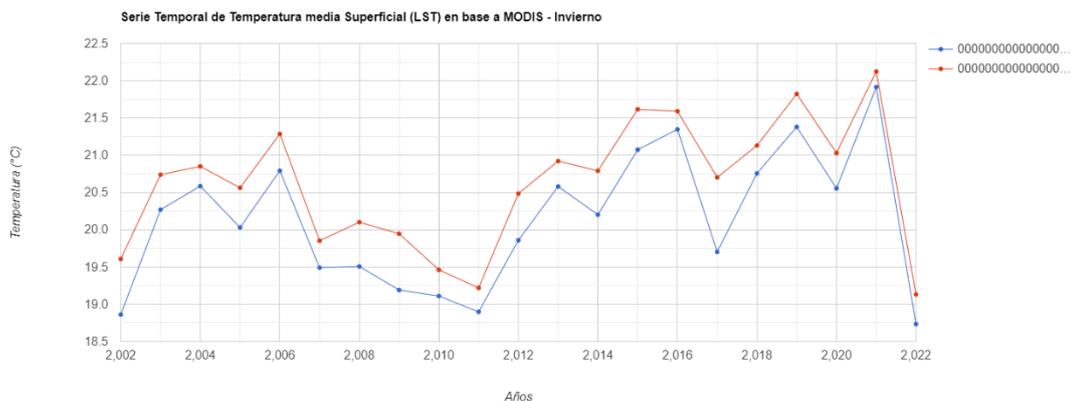
Fuente: Elaboración propia

Anexo 57: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 5 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



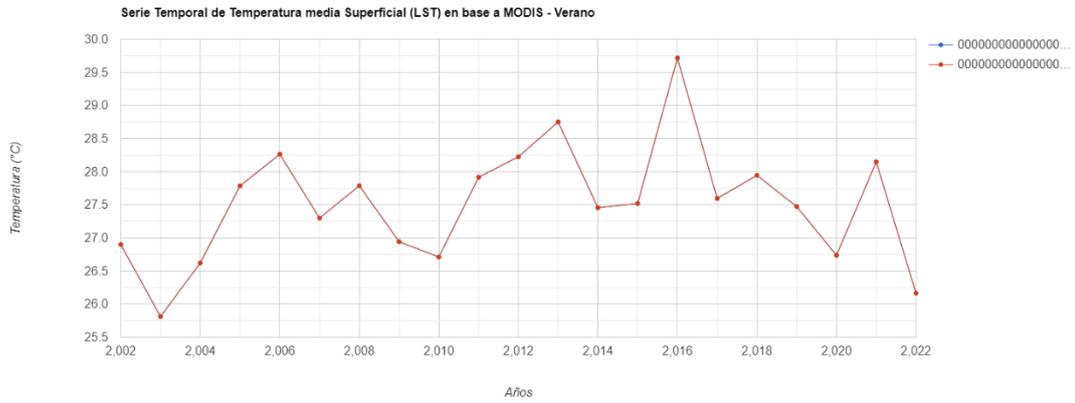
Fuente: Elaboración propia

Anexo 58: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 5 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



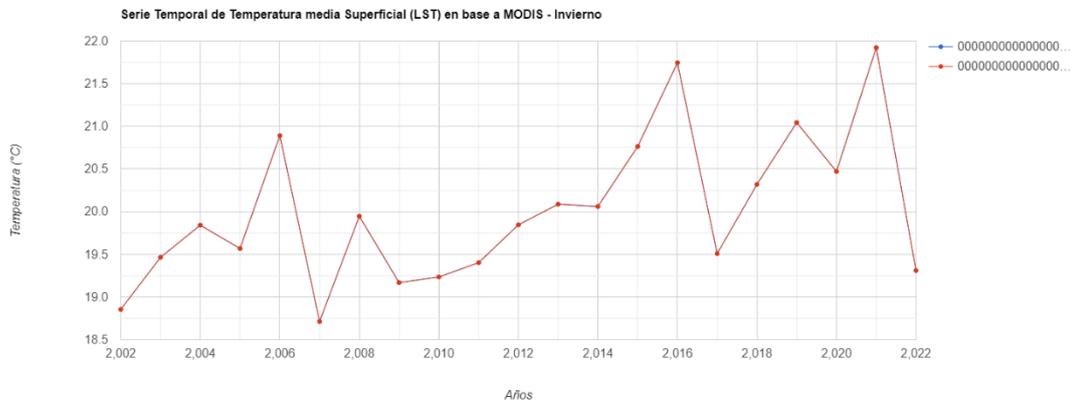
Fuente: Elaboración propia

Anexo 59: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 6 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



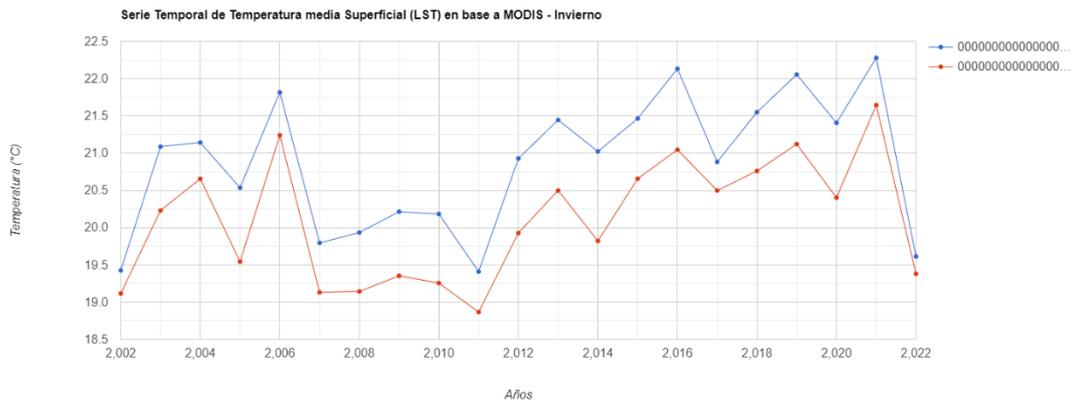
Fuente: Elaboración propia

Anexo 60: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 6 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



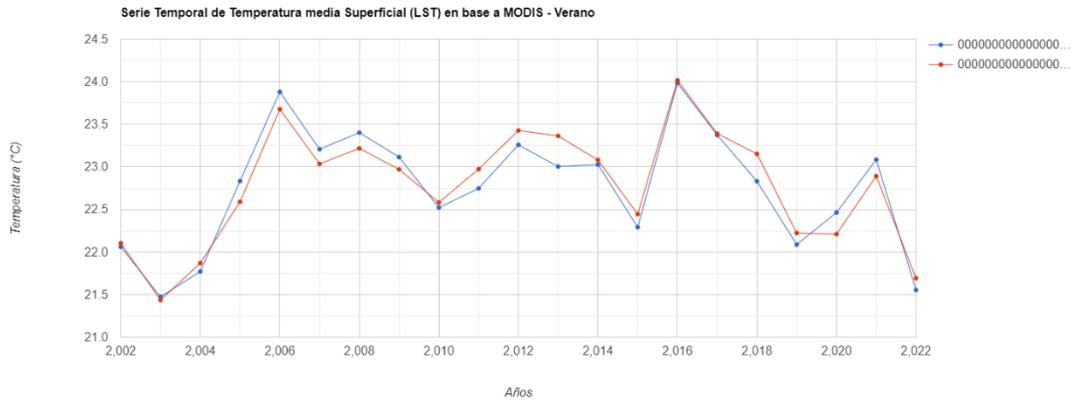
Fuente: Elaboración propia

Anexo 61: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 7 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



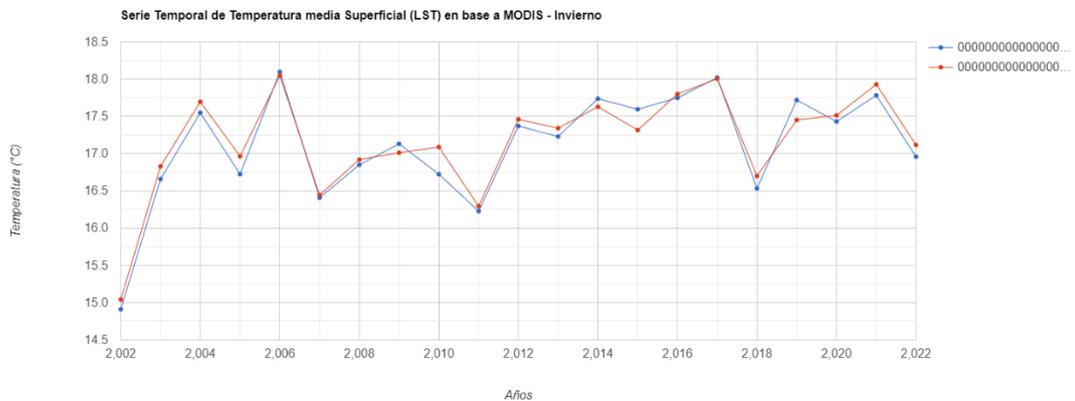
Fuente: Elaboración propia

Anexo 62: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 8 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



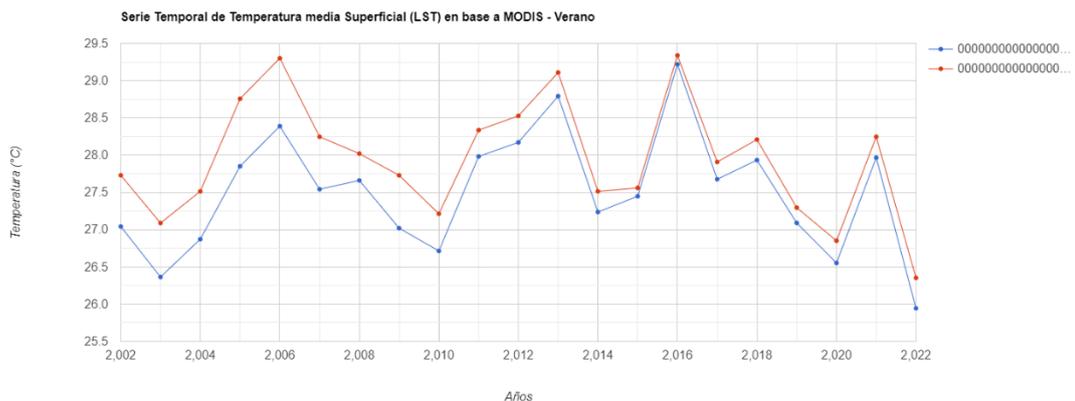
Fuente: Elaboración propia

Anexo 63: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 8 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



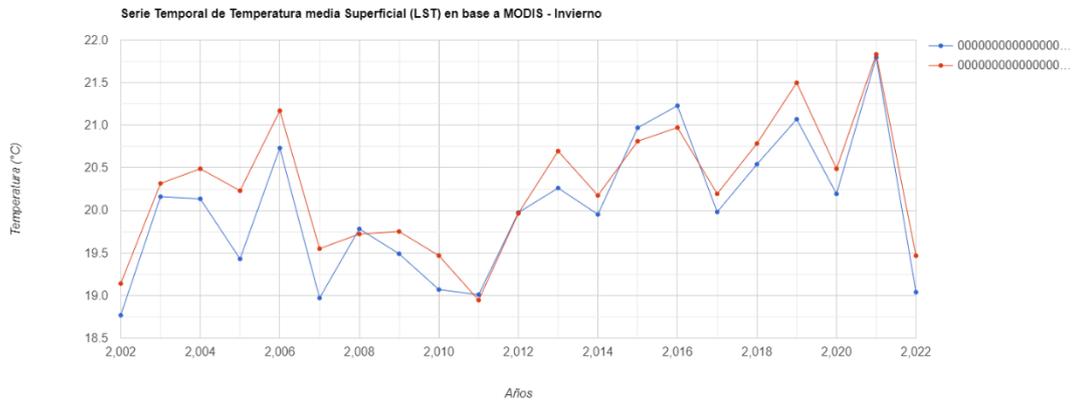
Fuente: Elaboración propia

Anexo 64: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 9 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



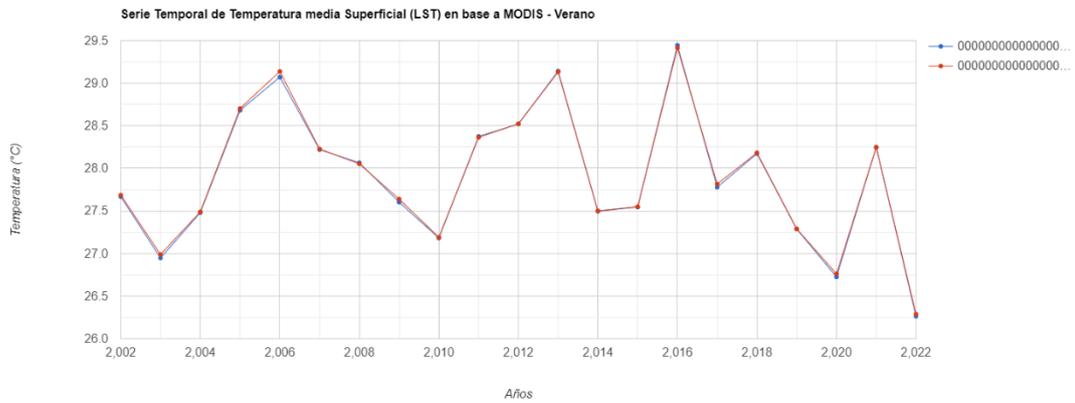
Fuente: Elaboración propia

Anexo 65: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 9 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



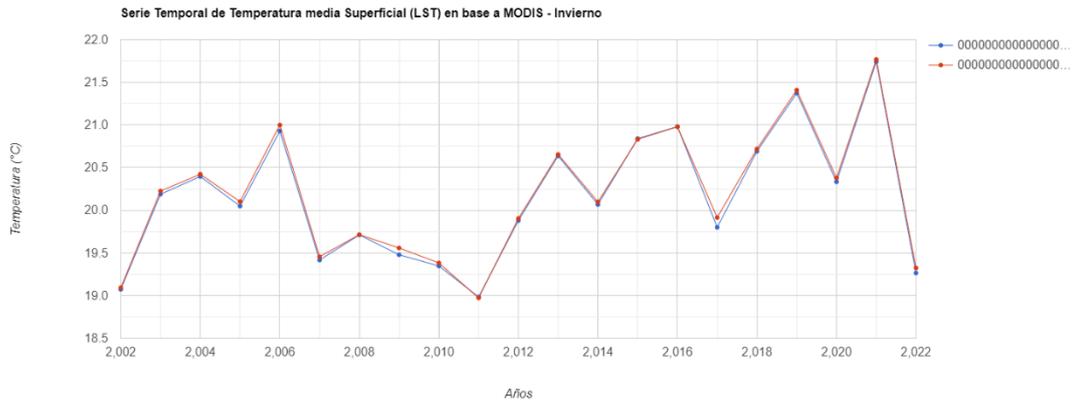
Fuente: Elaboración propia

Anexo 66: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 10 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



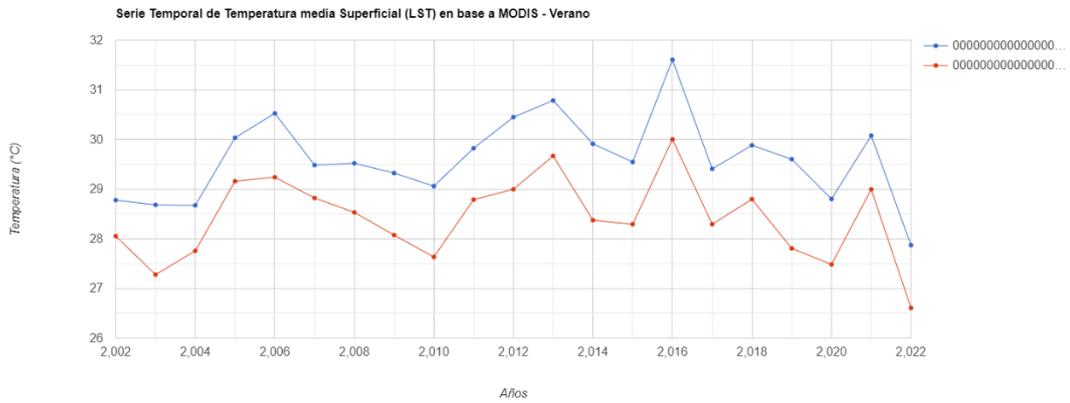
Fuente: Elaboración propia

Anexo 67: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 10 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



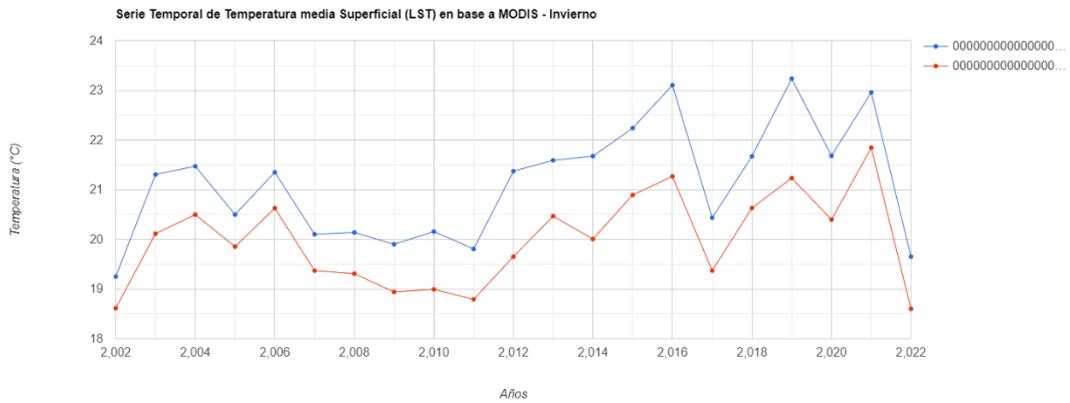
Fuente: Elaboración propia

Anexo 68: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Verano (2002-2022) del Punto 11 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 69: Serie Temporal de la Temperatura Superficial Media de Invierno (2002-2022) del Punto 11 en La Serena: Cambio de Rural a Urbano Basado en MODIS.



Fuente: Elaboración propia