

Olivares-Solís, A.; Serra Ruiz, P.; Meseguer-Ruiz, O. Downscaling estadístico de LST diurna y nocturna de MODIS. Evaluación e impacto en la detección de patrones espaciales de mortalidad relacionada al calor en adultos mayores

# Downscaling estadístico de LST diurna y nocturna de MODIS. Evaluación e impacto en la detección de patrones espaciales de mortalidad relacionada al calor en adultos mayores

**Olivares-Solís, Angelo Hernane**<sup>1</sup> **Serra Ruiz, Pere**<sup>1</sup> **Meseguer-Ruiz, Oliver**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Barcelona, España

<sup>2</sup> Universidad de Tarapacá, Chile

ORCID: Olivares-Solís 0009-0003-6011-5993 Serra Ruiz 0000-0003-1023-5586 Meseguer-Ruiz 0000-0002-2222-6137

Correspondencia: [AngeloHernaneAquile.Olivares@autonoma.cat](mailto:AngeloHernaneAquile.Olivares@autonoma.cat) [pere.serra@uab.cat](mailto:pere.serra@uab.cat) [omeseguer@academicos.uta.cl](mailto:omeseguer@academicos.uta.cl)

## RESUMEN

La resolución espacial moderada de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) a menudo limita la detección satelital de asociaciones térmicas-sanitarias en entornos urbanos heterogéneos. Este estudio evalúa un downscaling estadístico de LST (100 m) respecto a MODIS (1 km) en 35 comunas de Santiago de Chile. Se seleccionaron cinco capítulos, según la Clasificación Internacional de Enfermedades, con evidencia bibliográfica de sensibilidad al calor extremo (cardiovasculares, respiratorias, endocrinas, renales y mentales). Sus defunciones (2017–2025) en adultos mayores  $\geq 65$  años se agregaron por comuna y se calculó su tasa de mortalidad específica por 10 mil habitantes. Se generaron cuatro productos LST (MODIS y downscaling, día/noche) y se compararon mediante la correlación de Pearson, y los Índices de Moran Univariado y Bivariado locales. Los resultados muestran que, durante el día, el downscaling supera consistentemente a MODIS: la correlación con la mortalidad aumenta de  $r=0,24$  ( $p=0,163$ ) a  $r=0,33$  ( $p=0,052$ ), acercándose al umbral de significancia estadística; el Moran bivariado incrementa de 0,215 a 0,220 y se duplican las comunas con alta significancia local ( $p<0,01$ ). Además, identifica un nuevo clúster de alto riesgo en Conchalí, no detectada con MODIS LST. Durante la noche, el downscaling presenta una correlación superior ( $r=0,55$ ;  $p<0,001$ ) frente a MODIS ( $r=0,52$ ;  $p=0,001$ ), manteniendo la misma estructura de clústeres. Se concluye que el downscaling de LST a 100 m mejora la capacidad para detectar patrones de riesgo entre mortalidad y calor en entornos urbanos heterogéneos, validando el uso de la teledetección para estudios de salud pública y clima urbano.


**Palabras clave:** *Temperatura superficial terrestre, downscaling estadístico, mortalidad, Santiago de Chile*


Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 17 febrero 2026

# Downscaling estadístico de LST diurna y nocturna de MODIS. Evaluación e impacto en la detección de patrones espaciales de mortalidad relacionada al calor en adultos mayores


Olivares-Solís, Angelo Hernane <sup>(1)</sup>, Serra Ruiz, Pere <sup>(1)</sup>, Meseguer-Ruiz, Oliver <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Autónoma de Barcelona, España.

 0009-0003-6011-5993, angelohernaneaqueile.olivares@autonoma.cat

 0000-0003-1023-5586, pere.serra@uab.cat

<sup>(2)</sup> Universidad de Tarapacá, Chile.

 0000-0002-2222-6137, omeseguer@academicos.uta.cl

**Resumen:** La resolución espacial moderada de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) a menudo limita la detección satelital de asociaciones térmicas-sanitarias en entornos urbanos heterogéneos. Este estudio evalúa un *downscaling* estadístico de LST (100 m) respecto a MODIS (1 km) en 35 comunas de Santiago de Chile. Se seleccionaron cinco capítulos, según la Clasificación Internacional de Enfermedades, con evidencia bibliográfica de sensibilidad al calor extremo (cardiovasculares, respiratorias, endocrinas, renales y mentales). Sus defunciones (2017–2025) en adultos mayores  $\geq 65$  años se agregaron por comuna y se calculó su tasa de mortalidad específica por 10 mil habitantes. Se generaron cuatro productos LST (MODIS y *downscaling*, día/noche) y se compararon mediante la correlación de Pearson, y los Índices de Moran Univariado y Bivariado locales. Los resultados muestran que, durante el día, el *downscaling* supera consistentemente a MODIS: la correlación con la mortalidad aumenta de  $r=0,24$  ( $p=0,163$ ) a  $r=0,33$  ( $p=0,052$ ), acercándose al umbral de significancia estadística; el Moran bivariado incrementa de 0,215 a 0,220 y se duplican las comunas con alta significancia local ( $p<0,01$ ). Además, identifica un nuevo clúster de alto riesgo en Conchalí, no detectada con MODIS LST. Durante la noche, el *downscaling* presenta una correlación superior ( $r=0,55$ ;  $p<0,001$ ) frente a MODIS ( $r=0,52$ ;  $p=0,001$ ), manteniendo la misma estructura de clústeres. Se concluye que el *downscaling* de LST a 100 m mejora la capacidad para detectar patrones de riesgo entre mortalidad y calor en entornos urbanos heterogéneos, validando el uso de la teledetección para estudios de salud pública y clima urbano.

**Palabras clave:** Temperatura superficial terrestre, *downscaling* estadístico, mortalidad, Santiago de Chile

## ***Statistical downscaling of daytime and nighttime MODIS LST: Evaluation and impact on the detection of spatial patterns of heat-related mortality in older adults***

**Abstract:** Moderate-resolution satellite Land Surface Temperature (LST) products are often insufficient to capture intra-urban thermal heterogeneity and its association with health outcomes. This study evaluates whether a statistical downscaling of LST (100 m) improves the detection of the association between land surface temperature and heat-sensitive mortality compared to the original MODIS product (1 km) in 35 urban communes of Santiago, Chile. Five ICD-10 chapters with documented heat sensitivity (cardiovascular, respiratory, endocrine, renal and mental) were selected; deaths (2017–2025) of adults older than 65 years were aggregated by commune and their specific death rate per 10000 inhabitants was calculated. Four thermal surfaces were generated (MODIS and downscaled, day/night) and compared through Pearson correlation, Univariate Moran's I and Bivariate Local Moran's I. Results show during daytime, downscaling consistently outperforms MODIS: the correlation with mortality rises from  $r=0.24$  ( $p=0.163$ ) to  $r=0.33$  ( $p=0.052$ ), approaching statistical significance; bivariate Moran increases from 0.215 to 0.220 and the number of communes with high local significance ( $p < 0.01$ ) doubles. Furthermore, it identifies a new high-risk cluster in Conchalí, not detected by MODIS. At night, downscaling shows a higher correlation ( $r=0.55$ ;  $p<0.001$ ) compared to MODIS ( $r=0.52$ ;  $p=0.001$ ), maintaining the same cluster structure. It is concluded that LST downscaling at 100 m improves the capacity to detect heat-mortality risk patterns in heterogeneous urban environments, validating the use of remote sensing in public health and urban climate studies.

**Keywords:** Land surface temperature, statistical downscaling, mortality, Santiago de Chile

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento de las temperaturas extremas en entornos urbanos representa un riesgo creciente para la salud, especialmente en adultos mayores, quienes presentan mayor vulnerabilidad debido a comorbilidades y a la menor capacidad de termorregulación (Navas-Martín *et al.*, 2023). La heterogeneidad térmica urbana, determinada por la densidad de edificación, cobertura vegetal y superficies impermeables, genera islas de calor urbano (UHI) con temperaturas significativamente más altas que en áreas circundantes (Oke *et al.*, 2017). Las técnicas de teledetección permiten caracterizar este calor urbano mediante datos de LST obtenidos de sensores como MODIS; sin embargo, su resolución espacial (~1 km) resulta insuficiente para captar heterogeneidades críticas para la salud, limitación que puede superarse mediante *downscaling* estadístico.

La validación de productos *downscaled* suele compararse con el original mediante métricas estadísticas convencionales, aunque esta aproximación presenta limitaciones que imposibilitan comparaciones *post-hoc* independientes (Manvailier y Hamann, 2024). Frente a ello, una estrategia complementaria consiste en evaluar el producto según su capacidad para detectar fenómenos del mundo real; en este caso, los registros comunales de mortalidad constituyen una fuente independiente y epidemiológicamente significativa que permite valorar si el aumento de resolución espacial mejora la detección de asociaciones térmico-sanitarias.

Este trabajo tiene como área de estudio las comunas urbanas de Santiago de Chile, ciudad de clima mediterráneo con marcada segregación socioespacial y una población adulta mayor en rápido crecimiento. Estudios previos han analizado la LST y la UHI en Santiago y su asociación con niveles socioeconómicos (Montaner-Fernández *et al.*, 2020; Sarricolea *et al.*, 2022), pero ninguno ha evaluado el rol de la resolución espacial de LST en la detección de patrones de mortalidad estival en poblaciones vulnerables.

¿Puede el *downscaling* estadístico de LST diurna y nocturna (100 m) mejorar la detección de la asociación espacial entre altas temperaturas y mortalidad en adultos mayores  $\geq 65$  años respecto a MODIS (1 km)? Nuestra hipótesis es que el *downscaling* mejorará la magnitud y significancia espacial de dicha asociación, cuantificable mediante correlación de Pearson, Índice de Moran y análisis *Local Indicator of Spatial Association* (LISA).

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El estudio comprende 35 comunas urbanas de Santiago, Región Metropolitana y capital de Chile (33°26'S, 70°39'O), situada en una cuenca flanqueada por la Cordillera de la Costa y los Andes, lo que favorece condiciones de inversión térmica y limitada ventilación. El clima es de tipo mediterráneo continental (Csb) caracterizado por inviernos suaves y lluviosos, y veranos secos y calurosos. La superficie total considerada es de 7.855,9 km<sup>2</sup>, con una población de adultos mayores ( $\geq 65$  años) de 974.084 habitantes según datos del Censo 2024 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

### 2.2. Datos de población y mortalidad

#### 2.2.1. Fuente de datos

Se obtuvieron datos de defunciones de adultos mayores ( $\geq 65$  años) para el período 2017–2025, proporcionados por el Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) del Ministerio de Salud de Chile. Los registros incluyen la comuna de residencia habitual, la fecha de defunción y la causa básica de muerte, codificada según la Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades (CIE-10), 10.<sup>a</sup> revisión.

#### 2.2.2. Selección de causas de defunciones

Se seleccionaron cinco capítulos CIE-10 con evidencia documentada de asociación aguda con el calor: enfermedades circulatorias (I00–I99), respiratorias (J00–J99), endocrinas (E00–E90), genitourinarias (N00–N99) y trastornos mentales (F00–F99).

#### 2.2.3. Agregación y normalización

Para cada comuna, se sumaron las defunciones de los cinco capítulos seleccionados, obteniendo un conteo único de mortalidad agregada. Sobre esta variable, se calculó la tasa de mortalidad específica en adultos mayores ( $\geq 65$  años) por 10.000 habitantes.

### 2.3. Datos LST y *downscaling*

#### 2.3.1. MODIS original

Se utilizaron imágenes de los productos MODIS Terra (MOD11A1, ~10:30 h) y Aqua (MYD11A1, ~22:30 h), obtenidas mediante *Google Earth Engine (JavaScript)*, correspondientes a enero, febrero y diciembre de 2017–2025, con píxeles de calidad óptima (QC=0). Se calculó una media temporal única por píxel para día y noche respectivamente, obteniendo 175 imágenes válidas distribuidas según la Tabla 1.

**Tabla 1.** Número de imágenes MODIS válidas (QC=0) por año para los productos diurno (MOD11A1) y nocturno (MYD11A1).

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Total
N° imágenes	19	20	19	20	19	19	20	20	19	175

#### 2.3.2. *Downscaling* estadístico

Se aplicó un *downscaling* mediante *Random Forest* en *Google Earth Engine* con 3.000 puntos de entrenamiento distribuidos a distintos niveles de altura, 300 árboles y variables PerSplit=4. Para la LST diurna, los predictores

espectrales derivados de Sentinel-2 fueron NDVI (vegetación), NDBI (área construida), NDSI (suelos áridos), NDWI (humedad en vegetación), MNDWI (cuerpos de agua) y albedo de banda ancha; los topográficos fueron altitud, pendiente, orientación norte, rugosidad y posición topográfica (NASADEM, 30 m).

Para la LST nocturna se sustituyeron MNDWI, albedo y las variables de pendiente, orientación, inercia térmica (diferencia LST diurna–nocturna MODIS), emisividad (banda Emis\_31, MOD11A1) y posición en valle, todas ellas como variables relevantes para los procesos de enfriamiento radiativo nocturno. Las capas resultantes (100 m) se agregaron por comuna mediante promedio zonal.

## 2.4. Análisis estadístico

### 2.4.1. Correlación

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre la tasa de mortalidad específica y cada producto LST (MODIS día, *downscaling* día, MODIS noche, *downscaling* noche). La significancia estadística se evaluó con un nivel de confianza del 95% ( $p \leq 0,05$ ).

### 2.4.2. Autocorrelación espacial univariada

Sobre los mismos productos LST, se caracterizó el patrón espacial de cada uno mediante el Índice de Moran Univariado y se identificaron clústeres locales con LISA. Todos los análisis de significancia basados en LISA univariado y bivariado se realizaron con 999 permutaciones ( $p < 0,05$ ), empleando una matriz de vecindad de tipo Reina (*Queen*).

### 2.4.3. Autocorrelación espacial bivariada

Se aplicó el Índice de Moran Bivariado entre la tasa de mortalidad específica por comuna y el promedio la LST (día y noche), con análisis LISA bivariado clasificando los clústeres como Alto–Alto (HH), Bajo–Bajo (LL), Alto–Bajo (HL) y Bajo–Alto (LH).

El tratamiento de los datos se realizó en R y los análisis espaciales en GeoDa.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Evaluación del producto *downscaling*

La comparación entre el producto LST *downscaled* (100 m) y MODIS LST (1 km), mediante reagregación espacial a 1 km, muestra una alta concordancia en día y noche. Durante el día, el *downscaling* alcanzó un  $R^2 = 0,82$ , un error RMSE de  $0,98 \text{ }^\circ\text{C}$  y un sesgo prácticamente nulo (Bias =  $0,02 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Por la noche, la concordancia fue aún mayor ( $R^2 = 0,90$ ), con errores más bajos (RMSE =  $0,295 \text{ }^\circ\text{C}$ ; MAE =  $0,22 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y un sesgo despreciable (Bias =  $0,007 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Estos valores confirman que el *downscaling* reproduce fielmente la estructura térmica original, constituyendo una base sólida para los análisis comparativos posteriores.

### 3.2. Patrones espaciales univariado de las LST

#### 3.2.1. LST diurna

El análisis univariado de LST mostró diferencias sustantivas entre el producto *downscaled* y MODIS. En la Tabla 2, se puede observar que el primero mejoró sustancialmente la detección del patrón térmico diurno, con un Moran  $I = 0,697$  ( $p < 0,001$ ). Se identificaron nueve clústeres de HH: Renca, Cerro Navia, Quinta Normal, Estación Central, Santiago, Pudahuel, Pedro Aguirre Cerda, Conchalí y Lo Prado; y seis clústeres de LL correspondientes a Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, Providencia, la Reina, y Puente Alto. La significancia local

aumentó: ocho comunas con  $p < 0,05$ , cuatro con  $p < 0,01$  y tres con  $p < 0,001$ .

**Tabla 2.** Comparación de Moran I univariado y bivariado entre MODIS (1 km) y *downscaling* (100 m).

Período	Producto	Moran I (Univ.)	$p$	Moran I (Biv.)	$p$
Día	1 km	0,542	0,001	0,215	0,004
	100 m	0,697	0,001	0,220	0,004
Noche	1 km	0,560	0,001	0,138	0,045
	100 m	0,526	0,001	0,136	0,046

### 3.2.2. LST nocturna

Durante la noche, el comportamiento fue diferente, el *downscaling* presentó un Moran  $I = 0,526$  ( $p < 0,001$ ), ligeramente inferior al de MODIS (Tabla 2). Ambos productos identificaron los mismos seis clústeres de HH (Vitacura, Recoleta, Santiago, Providencia, Ñuñoa y La Reina). Sin embargo, el *downscaling* incorpora San Bernardo como un nuevo clúster LL, junto a Puente Alto, La Pintana y El Bosque. La significancia local fue comparable entre ambos, con una ligera mejora del *downscaling* en el número de comunas con  $p < 0,05$ .

Estos resultados indican que el producto LST *downscaling* aumenta la capacidad de detectar heterogeneidad térmica intraurbana durante el día, mientras que en la noche conserva la estructura espacial del producto original y la refina mediante la incorporación de un nuevo clúster frío (San Bernardo).

## 3.3. Correlación entre mortalidad y LST

### 3.3.1. Correlación diurna

La correlación con la LST *downscaled* ( $r = 0,33$ ;  $p = 0,052$ ) fue superior a la obtenida con MODIS LST ( $r = 0,24$ ;  $p = 0,163$ ), acercándose al umbral de significancia estadística.

### 3.3.2. Correlación nocturna

Ambos productos mostraron correlaciones altas y altamente significativas. MODIS LST 1 km alcanzó  $r = 0,52$  ( $p = 0,00145$ ), mientras que el *downscaling* LST 100 m obtuvo un coeficiente superior ( $r = 0,55$ ;  $p = 0,00054$ ). El *downscaling* nocturno no degrada la señal térmica y mantiene una asociación robusta con la mortalidad.

## 3.4. Patrones espaciales bivariados

### 3.4.1. Mortalidad y LST MODIS 1km (día)

Con un Moran  $I = 0,215$  ( $p = 0,004$ ), se identificaron cuatro clústeres HH: Cerro Navia, Quinta Normal, Pedro Aguirre Cerda y San Miguel. Los clústeres de LL fueron cinco: Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, La Reina y Puente Alto. La significancia local alcanzó 10 comunas con  $p < 0,05$ , dos con  $p < 0,01$  y ninguna con  $p < 0,001$ .

### 3.4.2. Mortalidad y LST *Downscaling* 100 m (día)

Se obtuvo un Moran  $I = 0,220$  ( $p = 0,004$ ), superando al producto MODIS LST. Los clústeres HH se mantuvieron en cuatro, pero con una composición espacialmente más relevante: Conchalí, Cerro Navia, Quinta Normal y Pedro Aguirre Cerda, sustituyendo a San Miguel por Conchalí, comuna que presenta una de las mayores densidades de

población adulta mayor en Santiago (Figura 1a). Los clústeres LL se mantuvieron en cinco (Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, La Reina y Puente Alto). La mejora

más relevante se observó en la significancia local: ocho comunas con  $p < 0,05$ , cuatro con  $p < 0,01$  y tres con  $p < 0,001$ .

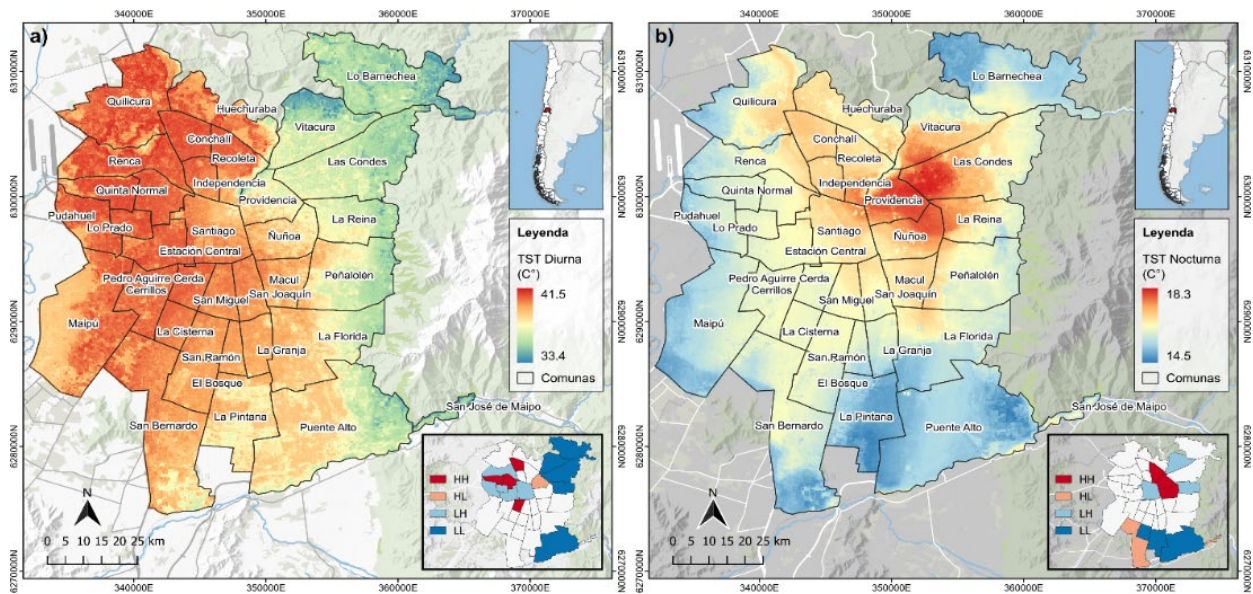


Figura 1. LST *downscaled* diurna (a) y nocturna (b) y sus respectivos clústeres bivariados con la tasa de mortalidad.

### 3.4.3. Mortalidad y LST MODIS 1km (noche)

Con un Moran  $I = 0,138$  ( $p = 0,045$ ), se identificaron tres clústeres HH: Recoleta, Providencia y Ñuñoa, y otros tres clústeres LL: Puente Alto, La Pintana y El Bosque. La significancia local mostró tres comunas con  $p < 0,05$ , tres con  $p < 0,01$  y tres con  $p < 0,001$ .

### 3.4.4. Mortalidad y LST *Downscaling* 100 m (noche)

Por último, con un Moran  $I = 0,136$  ( $p = 0,046$ ), prácticamente idéntico al producto LST de MODIS. Los clústeres HH se mantuvieron en las mismas tres comunas (Recoleta, Providencia, Ñuñoa) y los clústeres LL también se conservaron (Figura 1b). Se observó un ligero aumento en la significancia local (cuatro comunas con  $p < 0,05$  frente a tres en MODIS), manteniéndose tres comunas con  $p < 0,01$  y 3 con  $p < 0,001$ . En conjunto, el *downscaling* nocturno presenta un desempeño equivalente o ligeramente superior a MODIS en términos de significancia local.

## 4. CONCLUSIONES

El *downscaling* LST (100 m) supera a MODIS (1 km) en la detección de patrones térmico-sanitarios en Santiago. Durante el día, mejora la correlación con mortalidad ( $r = 0,33$  vs  $r = 0,24$ ) rozando la significancia estadística, identifica un nuevo clúster de alto riesgo en Conchalí y duplica las comunas con alta significancia local ( $p < 0,01$ ). En la noche, conserva la estructura de clústeres con desempeño equivalente a MODIS, incorporando San Bernardo como nuevo clúster frío. Estos hallazgos evidencian el potencial de la teledetección y sus técnicas de *downscaling* como herramientas valiosas para la vigilancia epidemiológica del calor en ciudades con alta heterogeneidad térmica y socioespacial.

## 5. REFERENCIAS

- Manvail, V., y Hamann, A. (2024). Validation of global precipitation time series products against tree ring records and remotely sensed vegetation greenness. *PLoS ONE*, 19(2), e0299111. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299111>
- Montaner-Fernández, D., Morales-Salinas, L., Rodríguez, J. S., Cárdenas-Jirón, L., Huete, A., Fuentes-Jaque, G., Pérez-Martínez, W., & Cabezas, J. (2020). Spatio-Temporal Variation of the Urban Heat Island in Santiago, Chile during Summers 2005–2017. *Remote Sensing*, 12(20), 3345. <https://doi.org/10.3390/rs12203345>
- Navas-Martín, M. Á., López-Bueno, J. A., Ascaso-Sánchez, M. S., Follos, F., Vellón, J. M., Mirón, I. J., Luna, M. Y., Sánchez-Martínez, G., Linares, C., & Díaz, J. (2023). Heat Adaptation among the Elderly in Spain (1983–2018). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1314. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021314>
- Núñez-Rodríguez, S., Collazo-Riobó, C., Sedano, J., Sánchez-Iglesias, A. I., & González-Santos, J. (2025). Heat Tolerance in Older Adults: A Systematic Review of Thermoregulation, Vulnerability, Environmental Change, and Health Outcomes. *Healthcare*, 13(21), 2785. <https://doi.org/10.3390/healthcare13212785>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban Climates. En Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Sarricolea, P., Smith, P., Romero-Aravena, H., Serrano-Notivoli, R., Fuentealba, M., & Meseguer-Ruiz, O., 2022. Socioeconomic inequalities and the surface heat island distribution in Santiago, Chile. *Sci. Total Environ*, 832, 155152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155152>