

## Variabilidad de la temperatura del aire y su comparación con datos MODIS LST en la península Hurd de la Isla Livingston, Antártida, entre 2000 y 2016

Recondo, C.<sup>(1,2)</sup>, Corbea-Pérez, A.<sup>(1,3)</sup>, Peón, J.<sup>(1)</sup>, Pendás, E.<sup>(4)</sup>, Ramos, M.<sup>(5)</sup>, Calleja, J.F.<sup>(3)</sup>, de Pablo, M.A.<sup>(6)</sup>, Fernández, S.<sup>(7)</sup>, Corrales, J.A.<sup>(8)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de investigación Remote Sensing Applications (RSApps), Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo. Campus de Mieres, C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, Asturias, España. mdrecondo@uniovi.es

<sup>(2)</sup> Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT), Universidad de Oviedo. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, Asturias, España.

<sup>(3)</sup> Grupo de investigación Remote Sensing Applications (RSApps), Departamento de Física, Universidad de Oviedo. C/ Calvo Sotelo s/n, 33007 Oviedo, Asturias, España.

<sup>(4)</sup> AEMET-Galicia. C\ Canceliña 8, 15011 A Coruña, Galicia, España.

<sup>(5)</sup> Departamento de Física y Matemáticas, Universidad de Alcalá. 28805 Alcalá de Henares, Madrid, España.

<sup>(6)</sup> Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá. 28805 Alcalá de Henares, Madrid, España.

<sup>(7)</sup> Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo, Asturias, España.

<sup>(8)</sup> Departamento de Informática, Universidad de Oviedo. Edificio Departamental 1, 33394 Gijón, Asturias, España.

**Resumen:** En los ambientes polares, tan vulnerables al cambio climático, el estudio de la temperatura es imprescindible. Por ello, y en el marco del proyecto PERMASNOW, en este trabajo hemos estudiado en detalle la variación de la temperatura del aire ( $T_a$ ) en la península Hurd de la isla Livingston (Antártida) y hemos tratado de estimarla a partir de los datos de temperatura de la superficie terrestre (LST, por sus siglas en inglés) del sensor MODIS entre los años 2000 y 2016. Utilizamos datos de  $T_a$  media diaria obtenidos en seis puntos, tres estaciones meteorológicas de AEMET y tres estaciones del proyecto PERMASNOW: Juan Carlos I (JCI), Glaciar Johnson (GJ), Glaciar Hurd (GH), Incinerador (INC), Reina Sofía (RS) y Collado Ramos (CR), respectivamente. Los datos MODIS LST son los diurnos y nocturnos de los satélites Terra y Aqua. La tendencia en  $T_a$  se ha analizado mediante la regresión localmente ponderada (LOESS, por sus siglas en inglés) y la relación  $T_a$ -LST con regresiones lineales múltiples. Concluimos que  $T_a$  en el área de estudio varía: se observa en la estación JCI, más cercana a la costa, una tendencia al enfriamiento con valores entre  $-2,3$  y  $-3,0^\circ\text{C}$  década<sup>-1</sup>. En cambio, las estaciones más alejadas de la costa y de mayor altitud muestran una tendencia al calentamiento (entre  $+0,2$  y  $+0,8^\circ\text{C}$  década<sup>-1</sup>). Los mejores modelos de estimación de  $T_a$  a partir de LST y variables temporales se obtienen con los datos diurnos de Terra ( $R^2=0,5-0,7$ ;  $RSE=2^\circ\text{C}$ ), exceptuando GJ, donde la variable LST no es significativa. Con la validación cruzada (CV) se aprecian también, excepto en GJ, mejores resultados con los datos diurnos de Terra ( $R^2_{CV}=0,5-0,6$ ;  $RMSE_{CV}=2,5-2,6^\circ\text{C}$ ). Finalmente, concluimos que los datos MODIS LST son útiles para estimar tendencias de  $T_a$  a largo plazo en el área de estudio.

**Palabras clave:** temperatura del aire, MODIS LST, LOESS, Antártida.

### *Variability of the air temperature and its comparison with MODIS Land Surface Temperature in the Hurd Peninsula of the Livingston Island, Antarctica, between 2000 and 2016*

**Abstract:** In polar zones, where satellite data are very useful due to the limited in situ data, it is therefore essential to study the air temperature behaviour. In the framework of the PERMASNOW project we estimated the air temperature ( $T_a$ ) in the Hurd Peninsula of Livingston Island (Antarctica) from the land surface temperature (LST) data of the MODIS between 2000 and 2016. We worked with  $T_a$  data obtained at six stations (3 AEMET meteorological stations and 3 PERMASNOW project stations: Juan Carlos I (JCI), Johnson Glacier (JG), Hurd Glacier (HG), Incinerator (INC), Reina Sofía (RS) and Collado Ramos (CR), respectively). In addition, we analyzed daytime and nighttime LST data from the Terra and Aqua satellites. Locally weighted regression (LOESS) and multiple linear regressions were used for statistical analysis. We conclude that the  $T_a$  in the study area varies: a cooling trend with values between  $-2.3$  and  $-3.0^\circ\text{C}$  decade<sup>-1</sup> is observed in JCI, which is closer to the coast. On the other hand, the stations farther from the coast and at higher altitudes show a warming trend (between  $+0.2$  and  $+0.8^\circ\text{C}$  decade<sup>-1</sup>). The best  $T_a$  models are obtained with Terra daytime data ( $R^2=0.5-0.7$  and  $RSE=2^\circ\text{C}$ ), except JG, where the LST variable is not significant. With cross validation (CV), better results are also seen, except in JG, with the daytime Terra data ( $R^2_{CV}=0.5-0.6$ ,  $RMSE_{CV}=2.5-2.6^\circ\text{C}$ ). In summary, MODIS LST data are useful for estimating long-term  $T_a$  trends in the study area.

**Keywords:** air temperature, MODIS LST, LOESS, Antarctica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las zonas polares son ambientes con una gran influencia en el clima global y, a la vez, muy vulnerables al cambio climático. El aumento de la temperatura en ellas puede implicar, entre otras consecuencias, el deshielo del permafrost. Por ello el estudio del comportamiento de esa variable meteorológica resulta imprescindible. Además, en los ambientes polares, los datos desde satélite son de gran utilidad debido a la escasez de datos *in situ*.

Varios autores describen una tendencia al calentamiento de la península Antártica (PA). Turner *et al.* (2005), describen esta tendencia a partir de datos de  $T_a$  entre 1950 y 2000 en el marco del proyecto Datos Antárticos de Referencia para la Investigación Ambiental (READER, por sus siglas en inglés). En el resto de la Antártida, en cambio, en ese mismo período, estos autores encuentran una tendencia anual de temperaturas con tasas mucho más bajas y variables, y calentamiento en algunas estaciones y enfriamiento en otras. En contraste con la tendencia antes descrita para la PA desde 1950, algunos autores encuentran una disminución de la temperatura en esa zona desde finales de la década de los 90 (Turner *et al.*, 2016; Oliva *et al.*, 2017).

Por otra parte, si bien no son muy frecuentes, encontramos algunos estudios sobre el comportamiento de  $T_a$  basados en la comparación con datos MODIS LST, que muestran una fuerte correlación entre ambas temperaturas en superficies de nieve, hielo y suelo congelado.

Teniendo en cuenta lo anterior, y en el marco del proyecto PERMASNOW, en este trabajo estimamos la temperatura del aire ( $T_a$ ) en la península Hurd de la isla Livingston (Antártida) a partir de los datos LST del sensor MODIS entre los años 2000 y 2016. Continuamos así una línea de investigación de la que hemos presentado resultados preliminares en congresos anteriores (Recondo *et al.*, 2017a,b,c).

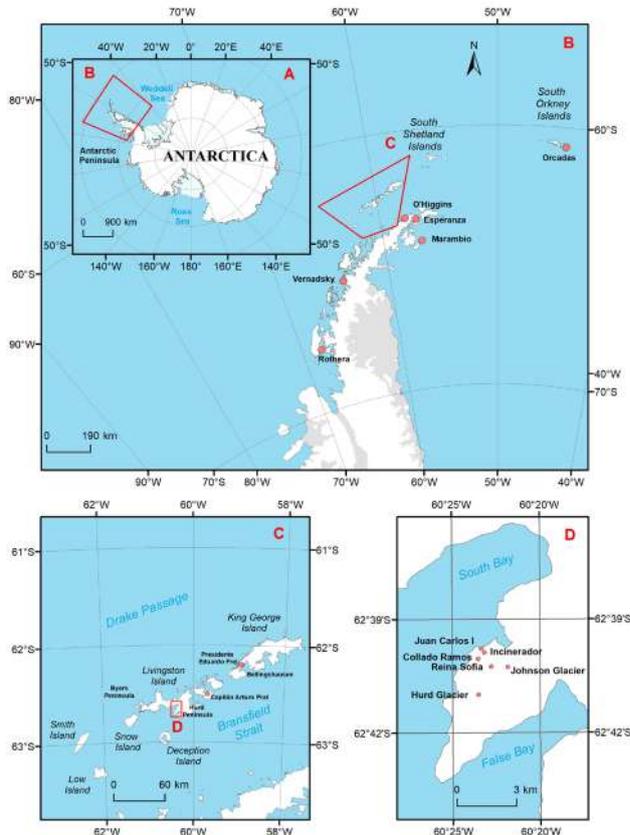
## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

Este estudio se centra en la península Hurd de la Isla Livingston, en el archipiélago Shetland del Sur (SSI) (Figura 1).

### 2.2. Datos

Los datos de  $T_a$  fueron obtenidos de las estaciones de la AEMET JCI (operativa desde el 16/02/1988 hasta el 30/12/2009 [JCI1] y desde el 31/12/2009 hasta la actualidad en una nueva ubicación [JCI2], GJ (desde el 01/12/2006 hasta el 24/01/2015) y GH (activa desde el 25/1/2015 hasta la actualidad); y de las estaciones del proyecto PERMASNOW en la zona de estudio: Incinerador (activa entre el 25/02/2000 y el 20/01/2006, y desde el 23/01/2006 hasta el presente en una nueva localización), Reina Sofia (del 25/02/2000 hasta el presente) y Collado Ramos (del 02/02/2006 hasta la actualidad). Para su comparación con MODIS, hemos tomado los datos de  $T_a$  solo desde el año 2000. Y el estudio se extiende hasta el año 2016.



**Figura 1.** Archipiélago Shetland del Sur (C), península Hurd en la isla Livingston y ubicación de las estaciones (D). Figura tomada de Recondo *et al.* (2019).

Se emplearon los productos MODIS versión 5 proporcionados por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio [NASA, por sus siglas en inglés: *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC)]. Los datos diurnos y nocturnos MODIS LST corresponden al producto MOD11A1 (Terra) y MYD11A1 (Aqua), con una resolución espacial de 1 km.

### 2.3. Metodología

La media diaria de  $T_a$  se obtuvo en cada estación meteorológica solo en el caso de que los datos diarios estuvieran completos ( $n=144$  para los datos de 10 minutos, y  $n=48$  para los datos de 0,5 horas). Los datos MODIS se obtuvieron en la localización de cada estación utilizando la herramienta Google Earth Engine (<http://earthengine.google.org>).

En primer lugar, comparamos  $T_a$  y  $T_{a-20cm}$  (a 20 cm del suelo) de las estaciones de la AEMET, donde existían datos de ambas, para verificar su correlación, siendo para ello suficientes regresiones lineales simples. En cambio, para estimar  $T_a$  a partir de MODIS LST, tuvimos que recurrir a regresiones lineales múltiples, usando como variables para la estimación de  $T_a$  no sólo LST, sino también variables temporales. En todos los casos, utilizamos regresiones robustas, para minimizar la influencia de valores atípicos. Los parámetros estadísticos utilizados para cuantificar la bondad del ajuste de los modelos son el  $R^2$  y RSE (*residual standard error*).

Para el análisis de la tendencia en  $T_a$  se empleó el LOESS, en el que la variable dependiente ( $T_a$ ) se suaviza a partir de la variable independiente tiempo (t) mediante el parámetro de suavizado  $\alpha'$ , que determina el tamaño del subconjunto de datos utilizados para ajustar cada polinomio local. El valor de  $\alpha'$  es la proporción de datos utilizados en cada ajuste, y oscila entre  $((\lambda+1)/n)$  y 1; donde  $\lambda$  es el grado del polinomio local y  $n$  el total de datos en cada serie analizada. Para nuestro análisis  $\lambda=2$  y  $\alpha'=1$ . Este último valor se selecciona porque resulta menos sensible a la variabilidad de los datos y, por lo tanto, más robusto en presencia de valores anómalos al estimar la tendencia de  $T_a$ .

Para la validación, usamos la validación cruzada de los resultados a partir del método *leave-one-out-cross-validation*, empleando los parámetros estadísticos  $R^2_{CV}$  y  $RMSE_{CV}$ .

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, hemos comprobado que  $T_a$  y  $T_{a-20\text{ cm}}$  están fuertemente correlacionadas, como se muestra en la Figura 2 para JCI, especialmente al aplicar el *proxy* de cubierta de nieve desarrollado por Bañón et al. (2013), basado en el análisis de las series de tiempo anuales de desviaciones estándar diarias de  $T_{a-20\text{ cm}}$  que elimina los valores de  $\sigma(T_{a-20\text{ cm}}) < 0,5^\circ\text{C}$ .

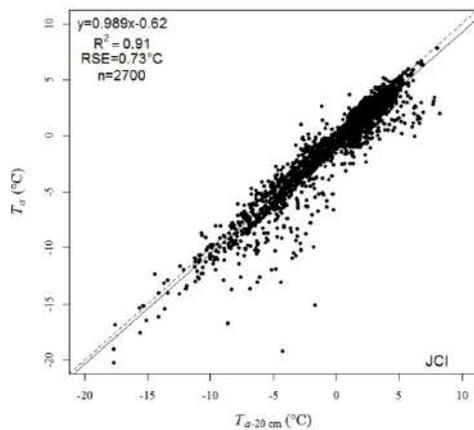


Figura 2. Regresión lineal  $T_a-T_{a-20\text{ cm}}$  en JCI.

La tendencia de  $T_a$  en el área de estudio muestra una disminución en la estación más cercana a la costa, JCI, para sus dos localizaciones ( $-2,3^\circ\text{C}/\text{década}$  en JCI1 y  $-3^\circ\text{C}/\text{década}$  en JCI2). El resto de las estaciones muestran una tendencia al calentamiento ( $0,2^\circ\text{C}/\text{década}$  en GJ e INC y  $0,8^\circ\text{C}/\text{década}$  en RS y CR). La Figura 3 muestra el aumento de  $T_a$  en RS, la estación situada a mayor altura y una de las más alejadas de la costa.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran la compleja variabilidad climática a escala espacial en la península Hurd de la isla Livingston, similar a lo descrito en otras áreas de la PA y del SSI. El calentamiento de INC es similar al obtenido en Bellingshausen (Isla Rey Jorge) entre 1948-2011 por Kejna et al. (2013) y al estimado por Steig et al. (2009) en la Antártida occidental entre 1957-2006. En cambio, el calentamiento de CR y RS supera incluso al valor encontrado en la PA por O'Donnell

et al. (2011) entre 1957-2006 y a la tendencia más alta de  $+0,54^\circ\text{C}/\text{década}^{-1}$ , encontrada por Turner et al. (2014) para el periodo 1951-2011 en la estación Faraday/Vernadsky. Por lo tanto, nuestro estudio muestra que la estación Faraday no es una excepción, porque la mayoría de nuestras estaciones se están calentando después del año 2000.

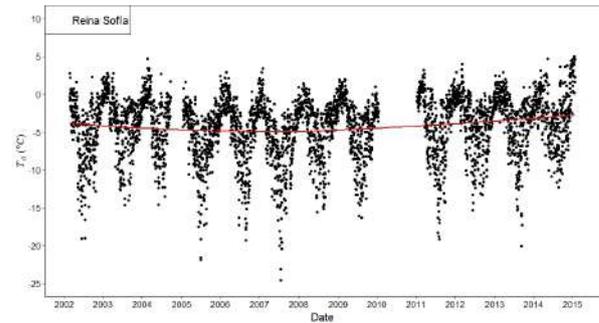


Figura 3. Variación temporal de  $T_a$  para el periodo de estudio en RS. La tendencia lineal de  $T_a$  obtenida con el método LOESS se muestra en color rojo en la serie.

En cuanto a la relación  $T_a$ -MODIS LST, no se obtuvieron resultados para GH dada la escasez de datos. Para el resto de estaciones los resultados fueron: JCI ( $R^2=0,6-0,7$ ;  $RSE=2^\circ\text{C}$ ), GJ ( $R^2=0,5-0,6$ , excepto para Terra Day que fue  $R^2=0,26$ ;  $RSE=2^\circ\text{C}$ , excepto para Terra Night que fue  $RSE=0,78^\circ\text{C}$ ), CR ( $R^2=0,6-0,7$ , excepto para Terra Night que fue  $R^2=0,36$ ;  $RSE=2-3^\circ\text{C}$ ), INC ( $R^2=0,5$  para los datos diurnos y  $R^2=0,3-0,4$  para los datos nocturnos;  $RSE=2^\circ\text{C}$ ) y RS ( $R^2=0,5-0,6$  para los datos diurnos y  $R^2=0,4$  para Aqua Night, mientras que el  $R^2$  de Terra Night no muestra correlación alguna;  $RSE=2-3^\circ\text{C}$ ). En la Figura 4 se muestra la relación entre los datos  $T_a$  y los LST diurnos de Terra para JCI.

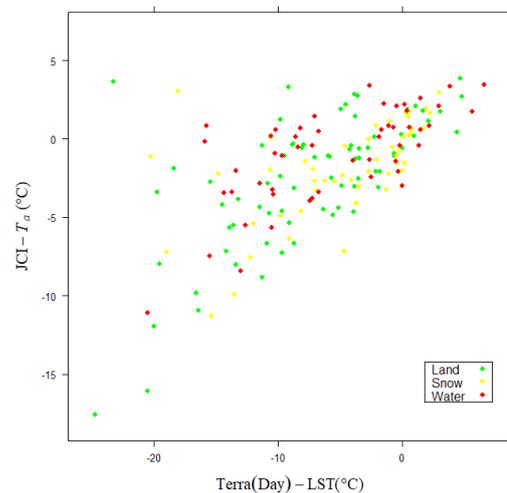


Figura 4. Relación entre  $T_a$  y LST Terra para JCI.

Los mejores modelos se obtuvieron para los datos diurnos de Terra ( $R^2=0,5-0,7$ ;  $RSE=2^\circ\text{C}$ ). Estos valores de  $R^2$  son inferiores a los obtenidos por Wang et al. (2013). En cambio, obtuvimos mejores resultados que estos autores en la validación de nuestros mejores modelos ( $RMSE_{CV}=2,5^\circ\text{C}$ ). Además, nuestros mejores modelos son peores en términos de  $R^2_{CV}$  ( $0,5-0,6$ ) y mejores en términos de  $RMSE_{CV}$  ( $2,5^\circ\text{C}$ ) que el modelo lineal simple

$T_a$ -LST ( $R^2_{cv}=0,64$ ;  $RMSE_{cv}=11^\circ\text{C}$ ) y el mejor modelo de *machine learning* (GBM:  $R^2_{cv}=0,71$ ;  $RMSE_{cv}=11^\circ\text{C}$ ) obtenido por Meyer *et al.* (2016) en 2013 con datos de 32 estaciones sobre el continente antártico (rango  $T_a$  de  $-80^\circ\text{C}$  a  $10^\circ\text{C}$ ). Por otra parte, estudios similares en el Ártico muestran que la correlación  $T_a$ -LST es más fuerte cuando las temperaturas son más bajas. Esto podría explicar nuestros peores resultados en términos de  $R^2$  frente a los de Wang *et al.* (2013) y Meyer *et al.* (2016) porque nuestros valores de  $T_a$  son más altos (de  $-25^\circ\text{C}$  a  $10^\circ\text{C}$ ) que los de estos autores.

#### 4. CONCLUSIONES

En este estudio, hemos propuesto modelos para estimar  $T_a$  media diaria en la península Hurd de la isla Livingston a partir de datos MODIS-LST y variables temporales. Los mejores modelos se obtuvieron a partir de los datos diurnos LST de Terra. Los modelos se han obtenido empíricamente y validado usando datos de estaciones meteorológicas y datos MODIS entre 2000 y 2016.

El análisis mostró una compleja variabilidad climática en la península Hurd en el período de estudio: la estación más cercana a la costa (JCI) muestra una clara tendencia de enfriamiento (entre  $-2,3$  y  $-3,0^\circ\text{C}$  década $^{-1}$ ), y las estaciones de mayor altitud muestran tendencias de calentamiento (entre  $+0,2$  y  $+0,8^\circ\text{C}$  década $^{-1}$ ). El estudio pone de manifiesto que los datos de  $T_a$  de todas las estaciones utilizadas son muy fiables y que los datos MODIS LST son útiles para estimar tendencias de  $T_a$  a largo plazo en el área de estudio.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a la financiación de la Agencia Estatal de Investigación a través del proyecto PERMASNOW [CTM2014-52021-R], la ayuda de la Universidad de Oviedo al Grupo de Investigación RSApps en 2018 [PAPI-18-GR-2016-0005] y las ayudas obtenidas por A.C.-P. (“Severo Ochoa” del Gobierno del Principado de Asturias [BP17-151] y “Ayuda Predoctoral” de la Universidad de Oviedo). C.R. también reconoce los fondos para su corta estancia en el IGOT (Universidad de Lisboa) del Banco Santander.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

Bañón, M. *et al.* 2013. Regional weather survey on Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarctic Science*, 25(2), pp.146–156.

Kejna, M. *et al.* 2013. Climatic change on King George Island in the years 1948–2011. *Polish Polar Research*, 34(2), pp. 213–235.

Meyer, H. *et al.* 2016. Mapping Daily Air Temperature for Antarctica Based on MODIS LST. *Remote Sensing*, 8(9), pp. 1–16.

O’Donnell, R. *et al.* 2011. Improved Methods for PCA-Based Reconstructions: Case Study Using the Steig *et al.* (2009) Antarctic Temperature Reconstruction. *Journal of Climate*, 24, 2099–2115.

Oliva, M. *et al.* 2017. Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere. *Science of The Total Environment*, 580, pp. 210–223.

Recondo, C. *et al.* 2017a. Comparación entre las temperaturas de la superficie terrestre obtenidas con el sensor MODIS y las temperaturas in situ medidas en la península Hurd, isla Livingston, Antártida. En J. Ruiz-Fernández *et al.* (Eds.), *Ambientes periglaciares: Avances en su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados* (185). Oviedo, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.

Recondo, C. *et al.* 2017b. Comparison of MODIS-derived Land Surface Temperature with in situ temperatures measured in the Hurd Peninsula, Livingston Island, Antarctica. First results. In J. A. Sobrino (Ed.), *Fifth Recent Advances in Quantitative Remote Sensing* (227-231). Valencia, Spain: Servicio Publicacions Universitat de Valencia.

Recondo, C. *et al.* 2017c. Comparación entre las temperaturas de superficie obtenidas con MODIS y las temperaturas in situ medidas en la península Hurd, isla Livingston, Antártida: Primeros resultados. En L.Á. Ruiz *et al.* (Eds.), *Teledetección: Nuevas plataformas y sensores de Teledetección* (11-14). Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

Steig, E.J. *et al.* 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, 457(7228), pp. 459–462.

Turner, J. *et al.* 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*, 25(3), pp. 279–294.

Turner, J. *et al.* 2014. Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record*, 50, 237–259

Turner, J. *et al.* 2016. Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535(7612), pp. 411–415.

Wang, Y. *et al.* 2013. A Comparison of MODIS LST Retrievals with in Situ Observations from AWS over the Lambert Glacier Basin, East Antarctica, *International Journal of Geosciences*. 04(03), pp. 611–617.