

Tarea N°2 Glaciología: Casquetes de hielo continentales y balance de masa glaciar

Paul Sandoval Quilodrán

Noviembre, 2022

1 Los hielos continentales:

(a) Menciona dos características glaciológicas comunes de Groenlandia y Antártica y al menos una característica glaciológica en la que se diferencian.

La principal característica glaciológica que comparten Antártica y Groenlandia (y que la diferencian del resto de los componentes de la criósfera del planeta), es que morfológicamente se definen como casquetes de hielo continentales (*ice sheets*) (Rivera et al., 2017), entendiéndose estos como grandes superficies de hielo terrestre cuya área es mayor a 50000 km^2 (Barry and YewGan, 2022; Rivera et al., 2017; Kotlyakov and Komarova, 2007), superando por más de dos ordenes de magnitud a los casquetes de hielo más grandes del globo (Marshall, 2011). Ambos casquetes continentales tienen características glaciológicas similares, como la presencia de corrientes (*ice streams*) y plataformas de hielo (*ice sheets*) que representan el principal componente dinámico de Antártica y Groenlandia (Marshall, 2011), además de ser lo suficientemente grandes como para influenciar la circulación atmosférica, el albedo planetario y muchos aspectos del clima regional (Marshall, 2011).

Dentro de sus principales diferencias se encuentran el espesor promedio de cada casquete continental, siendo Antártica quien tiene un mayor espesor promedio de 2160m (NSF, 2022) superando por mas de 500m el espesor promedio de 1600m (EEA, 2022) de Groenlandia.

(b) ¿Cuál es la contribución al nivel del mar cuando desaparezcan las lenguas flotantes de algunos glaciares de Groenlandia y Antártica?

Sabiendo que las lenguas glaciares flotantes *ice shelves* se ubican en las periferias de los hielos continentales y basado en la Tabla 6.1 (Figure 1) del texto *The Cryosphere* (Marshall, 2011), se podría decir que contribuirían a un aumento de 0.5 msl , siendo Antártica quien aportaría mayoritariamente con un 94% y Groenlandia con el 6% restante. Sin embargo, al considerar que estos *ice shelves* no están presentes en toda la periferia de Antártica y Groenlandia, además de que ya se encuentran flotando, es que no contribuirían al aumento del nivel del mar directamente (ley de Arquímedes) si no que su aporte indirecto estaría relacionado a que ya no darían estabilidad a los glaciares que fluyen hacia ellos, haciendo que su flujo se acelere (efecto corcho) (NSIDC, 2022; EGU, 2018).

Table 6.1
Global Glacier Area and Volume

<i>Region</i>	<i>Area</i> (10^6 km^2)	<i>Volume</i>	
		10^6 km^3	<i>msl</i>
Antarctica			
East Antarctic ice sheet	9.86	21.7	51.6
West Antarctic ice sheet ^a	1.81	3.0	4.6
Ice shelves	1.62 ^b	0.7	—
Peripheral icefields and ice caps ^c	0.47	0.17	0.43
Total	13.76	25.6	56.6
Greenland			
Greenland ice sheet	1.68	2.93	7.1
Peripheral icefields and ice caps	0.06	0.03	0.07
Total	1.74	2.96	7.2
Rest of the world			
Dyurgerov and Meier (2005)	0.54	0.13	0.31
Ohmura (2004)	0.52	0.05	0.13
Raper and Braithwaite (2005)	0.52	0.09	0.23
Radić and Hock (2010)	0.52	0.16	0.41
Global total	16.03	28.6	64.1

Note: msl is meters of global eustatic sea level equivalent, correcting for ice that is floating or grounded below sea level (see the section “Glacier and Ice Sheet Volume”).

^aWest Antarctic values exclude the Antarctic Peninsula.

^bIncludes ice rises.

^cIncludes the Antarctic Peninsula, estimated at 300,400 km² and 95,000 km³ (0.24 msl).

Figure 1: Área, volumen y contribución al nivel del mar de regiones englaciadas del planeta. Fuente: Marshall, 2011.

2 Gradientes de balance de masa y distribución de área:

En los archivos adjuntos SanRafael.csv y Colonia.csv hay datos de hipsometría y el perfil de balance de masa superficial específico anual de dos glaciares de Campo de Hielo Norte.

(a) Grafique la hipsometría y el perfil de balance de masa superficial de los dos glaciares y compárelos.

En la Figure 2 se puede apreciar la hipsometría, el perfil de balance de masa y ELA de ambos glaciares ($ELA_{rafael} \sim 1198msl$ y $ELA_{colonia} \sim 1349msl$). Para comenzar lo primero a mencionar es que el glaciar San Rafael subsiste en un rango altitudinal superior y a la vez presenta un rango areal mayor que el G. Colonia, es decir, es un glaciar más grande ($G. San Rafael = 721 km^2$, $G. Colonia = 288 km^2$). En cuanto a la relación entre el perfil de balance de masa y la hipsometría, en base a De Angelis (2014) puede decir que el G. Colonia debería ser más sensitivo a cambios de balance de masa debido a que su concentración de área se encuentra sobre el ELA, en cambio, el peak areal del G. Rafael se encuentra alrededor del ELA lo que implica una sensibilidad intermedia. De todas maneras se comprobará este punto en el apartado c). Finalmente es relevante mencionar que el G. San Rafael alcanza mayores ganancias de masa de hasta $60 mw.eq$ (que podría atribuirse a la altitud a la que se encuentra) y que el G. Colonia alcanza mayores pérdidas no atribuibles a su altitud, debido a que ambos perfiles comienzan en la misma cota.

Finalmente para lograr una buena comparación de los glaciares se presentan los balances de masa específicos para cada glaciar, resultando el G. San Rafael quien gana más masa por km^2 con un balance de $0.0017 mw.eq$ comparado con los $2.4 \cdot 10^{-6} mw.eq$.

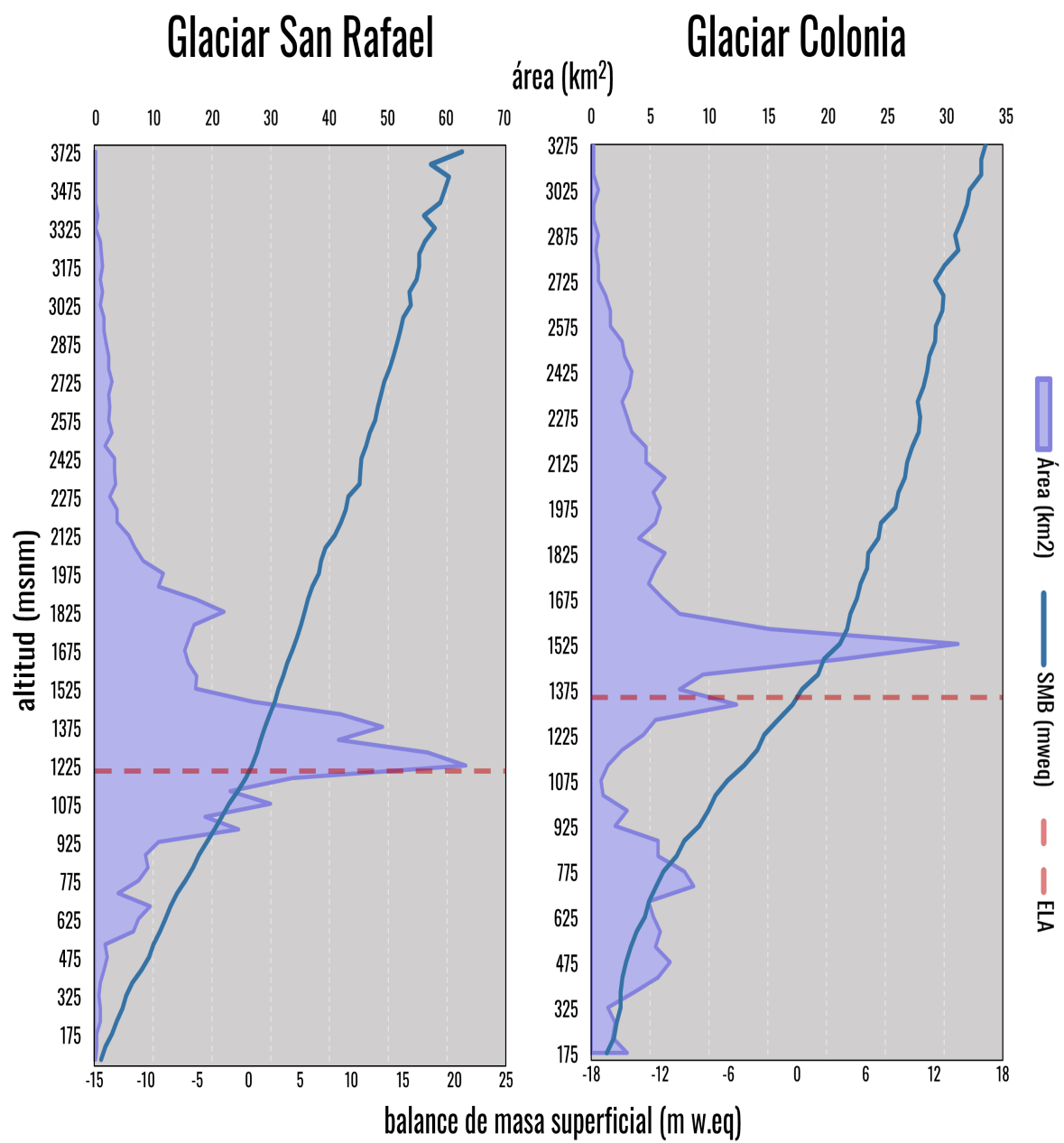


Figure 2: Hipsometría y perfil de balance de masa glaciares San Rafael y Colonia. Fuente: Elaboración propia.

(b) Determine el ratio del área de acumulación (AAR).

Considerando el *Accumulation Area Ratio* como:

$$AAR = \frac{AccumulationZone_{Area}}{TotalGlacier_{Area}} \quad (1)$$

Se obtiene un valor de 0.72 en el caso del G. San Rafael y 0.63 para el G. Colonia. Esta información en conjunto con el ELA ($ELA_{rafael} < ELA_{colonia}$) permiten obtener una primera aproximación al balance de masa de cada cuerpo de hielo, con estos datos se podría decir que el Glaciar San Rafael tiene un balance más positivo que el Glaciar Colonia (en términos generales $\uparrow AAR$ y $\downarrow ELA \implies$ balance de masa más positivo).

(c) ¿Cuál de los dos glaciares cree que reaccionaría más frente de la elevación de su ELA por 100 m? ¿Cuál de los dos glaciares les parece mas sensible a un calentamiento atmosférico? Fundamente su respuesta

Con el fin de responder a estas preguntas se trabajaron los datos discretamente en el intervalo altitudinal donde se ubica el ELA y se asumió un cambio paralelo del perfil del balance de masa (cambio paralelo basado en Kaser et al., 2003). Producto que un aumento de la línea de equilibrio responde a una disminución del perfil de balance de masa (en este caso con hipsometría constante) al perfil original se le restó un factor (f) calculado de la siguiente manera:

$$f = \frac{(LimiteIntervalo'_{sup} - LimiteIntervalo_{sup}) + (LimiteIntervalo'_{inf} - LimiteIntervalo_{inf})}{2} \quad (2)$$

Los límites indican intervalo del perfil del balance donde se ubica el ELA de condición original y límites' el intervalo de la condición con aumento de la línea de equilibrio.

Los resultado de aquel aumento se presentan en la Figure 3. Como se puede ver, el aumento del ELA sobrepasa el peak de areal en el G. San Rafael y se aproxima al peak hipsométrico en el caso del G. Colonia. Con el fin de estimar cuál glaciar tiene una mayor reacción y es más sensible al aumento, se calculó la variación del AAR, acumulación y ablación en términos porcentuales respecto a su condición original, esto permite comparar estos glaciares morfológicamente diferentes. Un resumen de los valores y resultados se presentan en la Table2. En base a los resultados obtenidos en la Table2 se concluye que el glaciar Colonia reacciona más frente a la elevación del ELA, donde, si bien su disminución porcentual de AAR es menor que el G. San Rafael, el aumento de la acumulación y disminución de la ablación son más significativas. El motivo de esto es que el aumento del ELA genera una mayor traslación del perfil de balance de masa haciéndolo más negativo aún. Esta mayor traslación (Ver Figure 3) se interpreta como que el glaciar Colonia es más sensible a un calentamiento atmosférico, ya que al ser más severo el cambio en el perfil del balance de masa esto se asocia mayormente a cambios en clima producto de los gradientes altitudinales que dominan algunos de estos procesos (Cuffey and Patterson, 2010). También es importante mencionar que a medida que aumente el calentamiento atmosférico cada vez se irá acercando más al peak de área, haciendo que su balance de masa sea aún más negativo. Finalmente cabe mencionar que estos resultados son coincidentes con el de De Angelis (2014), quien menciona que los glaciares son más sensibles a aumentos cuando el ELA está bajo el peak hipsométrico.

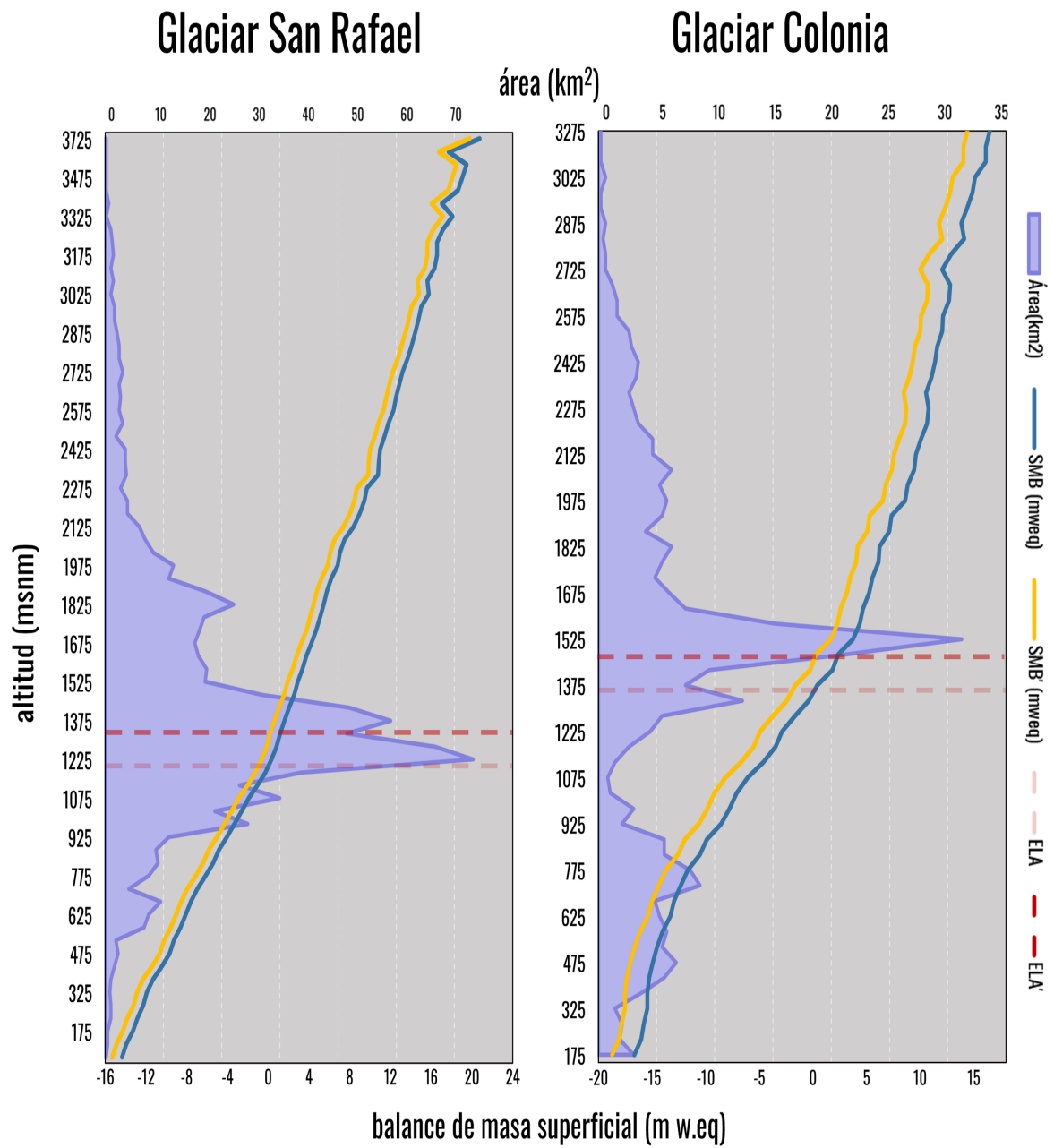


Figure 3: Perfil de balance de masa si el ELA aumentara 100m. SMB y ELA indican escenario original y SMB' y ELA' indican escenario aumento ELA en 100m. Fuente: Elaboración propia.

Table 1: Resumen sensibilidad de aumento del ELA en 100m. Fuente: elaboración propia.

Glaciar	AAR	AAR'	C km^3	C' km^3	A km^3	A' km^3	ΔAAR	ΔC	ΔA
San Rafael	0.72	0.55	515	468	-180	-203	-23%	-9%	13%
Colonia	0.63	0.57	363	288	-251	-303	-9.4%	-20.5	20.5

(d) Asumiendo una pérdida por calving de $1km^3$ de hielo por año para el Glaciar San Rafael y $0.1 km^3$ de hielo por año para el Glaciar Colonia, calcule el balance de masa de los dos glaciares

Considerando el balance de masa como:

$$B = C + A \quad (3)$$

Con B = balance de masa, C acumulación y A ablación.

Producto que la ablación es un proceso de pérdida de masa es que a este término debe sumarse el calving, teniendo en cuenta que el volumen dado debe convertirse a $mw.eq$ para ello es necesario multiplicar el volumen por la relación de las densidades entre el hielo y el agua (ρ_{ice}/ρ_{water}). Las densidad de cada material fueron obtenidos desde Cuffey and Patterson, (2010) quienes indican una densidad del hielo de $917kg/m^3$ y la densidad del agua $1000kg/m^3$.

Habiendo considerado lo anterior el balance de masa del glaciar san Rafael pasa de 1.22 a $0.31 km^3w.eq$ y el glaciar Colonia de 0.0007 a $-0.091 km^3w.eq$. Es decir, que el calving sería más trascendental para aquel año en el caso del glaciar Colonia producto que hace que su balance se torne negativo.

Es importante mencionar que todos los cálculos realizados en este apartado (2) se encuentran en el repositorio

https://github.com/SQPaul/Glaciology_classes/blob/main/Tarea2.ipynb

3 Medir el balance de masa de un glaciar:

(a) Indique tres métodos independientes para inferir el balance de masa de un glaciar.

Dentro de los métodos de balance de masa más utilizados se encuentran:

- **balance de masa glaciológico:**

Este método es el clásico utilizado en monitoreo de balance de masa superficial y el único basado en mediciones de terreno (Cuffey and Patterson, 2010; Kaser et al., 2003). El método consiste en medir el cambio de elevación en diferentes puntos e instantes del glaciar mediante el uso de estacas o balizas instaladas en la nieve y hielo (Rivera et al., 2017). Luego estos valores son multiplicados por la densidad cercana a la superficie entregando un estimado del balance en aquel punto (Kaser et al., 2003). Finalmente estos valores pueden ser promediados o interpolados para obtener un valor representativo de todo el glaciar (Rivera et al., 2017).

- **balance de masa geodésico:**

El método geodésico estima el cambio volumétrico del glaciar mediante la diferencia de elevación y superficie en dos instantes de tiempo (Rivera et al., 2017; Cuffey and Patterson, 2010;

Kaser et al., 2003). Entre las técnicas de medición utilizadas en este método se encuentran la fotogrametría, LIDAR, modelos digitales de elevación, entre otros (Rivera et al., 2017; Cuffey and Patterson, 2010).

- **Modelación:**

Esta técnica utiliza modelos meteorológicos para calcular los cambios de balance de masa superficial asumiendo procesos mecánicos como surging y avalanchas despreciables (Kaser et al., 2003; Cuffey and Patterson, 2010). Dependiendo de la precisión y disponibilidad de información diferentes modelos pueden ser aplicados, como aproximaciones simples grado-día o metodologías mas sofisticadas de balance de energía (Kaser et al., 2003). Cabe mencionar que para la obtención de resultados precisos, los datos de balance de masa deben ser calibrados en función de información glaciológica del área en estudio (Cuffey and Patterson, 2010).

(b) Indique por lo menos una ventaja y una desventaja de cada uno de los tres métodos mencionados.

Un resumen de las ventajas y desventajas de cada método se presentan en la Table 1.

Table 2: Ventajas y desventajas de diferentes métodos de balance de masa. Fuente: Basado en Rivera et al., 2017, Cuffey and Patterson, 2010 y Kaser et al., 2003

	Métodos		
	Glaciológico	Geodésico	Modelación
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Mide la densidad en terreno. - Entrega la información más detallada de la variación espacial de los componentes superficiales del balance. 	<ul style="list-style-type: none"> - Permite estimar el balance de glaciares remotos y de gran tamaño. 	<ul style="list-style-type: none"> - Permite la exploración de escenarios de cambio climático.*
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Complejidad de ejecución producto de las condiciones de terreno. - Solo aplicable a glaciares de menor tamaño. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presenta dificultades en la zona de acumulación debido a la aproximación de la densidad de la nieve y el firn. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es complejo obtener datos de calidad en lugares remotos para implementar y calibrar los modelos.*

* comentarios personales.

4 Bibliografía

- Barry, R. G., & Gan, T. Y. (2022). The global cryosphere: past, present, and future. Cambridge University Press.
- Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). The physics of glaciers. Academic Press.
- De Angelis, H. (2014). Hypsometry and sensitivity of the mass balance to changes in equilibrium-line altitude: the case of the Southern Patagonia Icefield. *Journal of Glaciology*, 60(219), 14-28.
- Greenland Ice Sheet. (s. f.). European Environment Agency. Recuperado 21 de noviembre de 2022, de <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenland-ice-sheet/greenland-ice-sheet-assessment-published>.
- Ice sheets. (21d. C.). National Science Foundation. <https://www.nsf.gov/geo/opp/antarct/science/icesheet>.
- Kaser, G., Fountain, A., Jansson, P., Heucke, E., & Knaus, M. (2003). A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers (Vol. 137). Paris: Unesco.
- Kotlyakov, V., & Komarova, A. (2006). Elsevier's dictionary of geography: in English, Russian, French, Spanish and German. elsevier.
- Marshall, S. J. (2011). The cryosphere (Vol. 4). Princeton University Press.
- National Snow and Ice Data Center. Recuperado 16 de noviembre de 2022, de <https://nsidc.org/learn/parts-cryosphere/ice-shelves/why-ice-shelves-matter>
- Rivera, A., Bown González, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2017). Manual Balance de masa glaciar.
- When ice shelves collapse, sea level can rise. But by how much? (2018, 19 julio). EGU. <https://www.egu.eu/education/planet-press/88/when-ice-shelves-collapse-sea-level-can-rise-but-by-how-much>.