

Kuantifikasi Penyusutan Gletser di Pegunungan Jayawijaya dan Relasinya dengan Perubahan Iklim

Mutia Rahma Apriani¹, Zulfikar Adlan Nadzir^{1,2*}

¹Program Studi Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia

²Institute of Geodesy and Geoinformation, University of Bonn, Germany.

* Email koresponden: zulfikar.nadzir@gt.itera.ac.id

Submitted: 2025-03-11 Revisions: 2025-09-11 Accepted: 2024-09-11 Published: 2025-09-22

©2025 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

©2025 by the authors. Majalah Geografi Indonesia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons

Attribution (CC BY SA) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Abstrak. Gletser tropis di Pegunungan Jayawijaya adalah indikator iklim yang sensitif dan telah mencair secara signifikan selama beberapa dekade terakhir. Kajian jangka panjang yang mengaitkan dinamika luas gletser Jayawijaya dengan indikator iklim global masih terbatas. Studi ini menggunakan citra Landsat selama 28 tahun (1995-2023) dan algoritma *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) dalam platform Google Earth Engine untuk memantau pencairan gletser. Untuk mengidentifikasi hubungan antara pencairan gletser dan indikator perubahan iklim lainnya, yaitu perubahan suhu permukaan tanah dan perubahan permukaan air laut, uji korelasi dan kesesuaian model regresi berbasis linier dilakukan. Ekstrapolasi ke masa depan dan masa lalu juga diestimasi untuk memprediksi dan meramalkan area gletser. Hasil menunjukkan bahwa pada 2023, 95,95% area gletser telah hilang dibandingkan tahun 1995 dan lebih cepat 2,6 dan 6 kali daripada penyusutan di gletser lintang tinggi. Tiga dari lima gletser telah lenyap, menyisakan East Northwall Firn dan Carstenz. Berdasarkan hasil, diperkirakan seluruh gletser akan menghilang pada tahun 2024. Selain itu, ditemukan hubungan kuat antara pencairan gletser dengan suhu dan muka laut ($r = -0,89$ dan $0,90$). Temuan ini memperkuat pemahaman tentang dampak iklim di wilayah tropis melalui data dengan resolusi spasial dan temporal tinggi dan menegaskan percepatan dampak iklim di daerah tropis.

Kata kunci: gletser tropis; Jayawijaya; landsat; Google Earth Engine; perubahan iklim

Abstract. Tropical glaciers in the Jayawijaya Mountains are sensitive climate indicators and have retreated markedly over recent decades. Long-term studies linking Jayawijaya glacier-area dynamics to global climate indicators remain limited. This study uses 28 years of Landsat imagery and the Normalized Difference Snow Index (NDSI) on the Google Earth Engine platform to monitor glacier loss. To identify relationships with other climate-change indicators—namely land surface temperature and sea-level change—we performed correlation tests and simple linear regression model fitting. We also used extrapolation to hindcast and forecast glacier area. Results show that by 2023, 95.95% of glacier area had disappeared relative to 1995, of which 2.6 and 6 times faster than the retreat rate on high-latitude glaciers. Three of five glaciers have vanished, leaving only East Northwall Firn and Carstenz. Based on our results, all glaciers were projected to disappear by 2024. We find strong relationships between glacier retreat and temperature and sea level ($r = -0.89$ and 0.90). These findings enhance understanding of tropical climate impacts using long, high-resolution satellite records and underscore accelerating climate risks in the tropics.

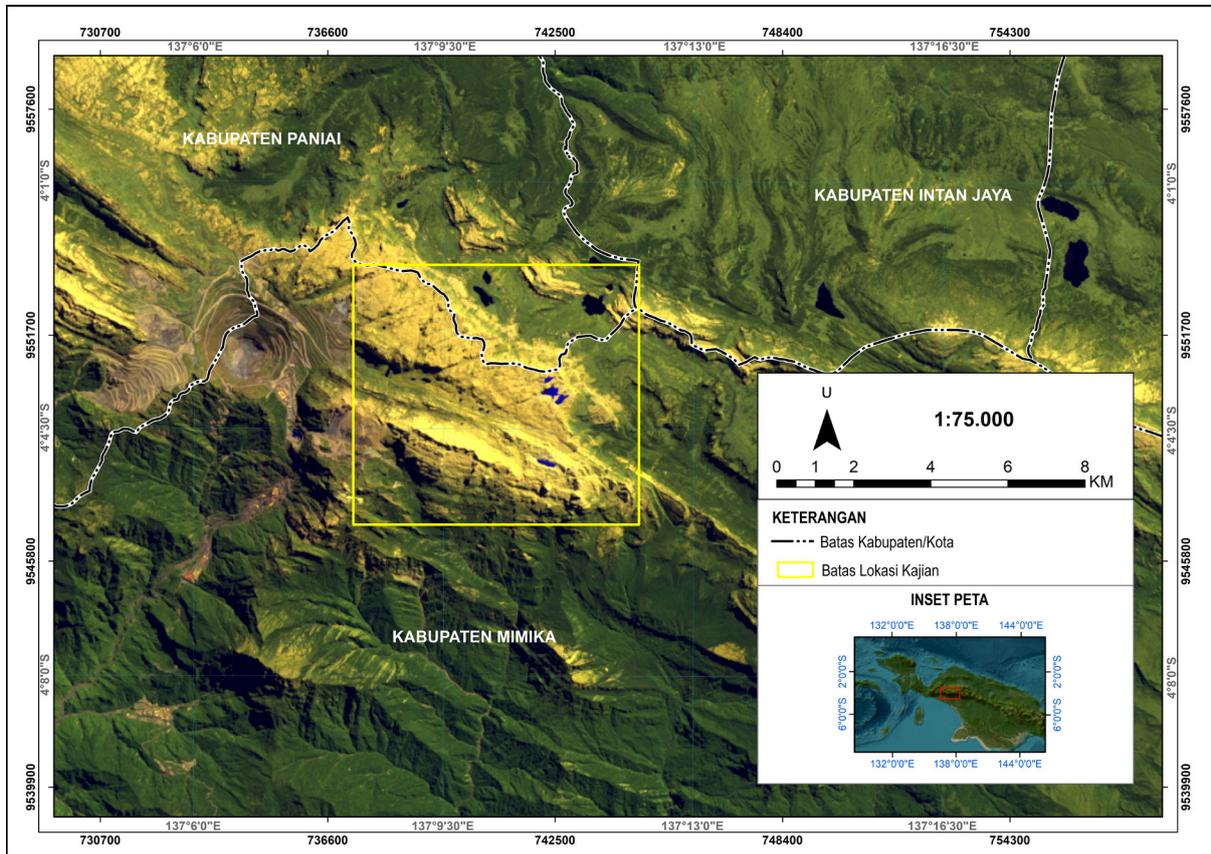
Keywords: tropical glacier; Jayawijaya; landsat; Google Earth Engine; climate change

PENDAHULUAN

Banyak gletser di seluruh bagian Bumi mengalami penyusutan dengan kecepatan yang tinggi dan menjadi salah satu bukti dari adanya perubahan iklim (Yang dkk., 2013). Perubahan gletser secara kuantitas baik luas, volume, dan massa gletser mengindikasikan adanya perubahan iklim (Zemp dkk., 2015). Perubahan iklim sendiri sebagian besar disebabkan oleh aktivitas manusia yang menyebabkan pemanasan dari gas rumah kaca yang didominasi oleh karbon dioksida dan metana (IPCC, 2023). Perubahan iklim telah terjadi di seluruh dunia dan salah satu efeknya adalah kenaikan suhu permukaan Bumi dan kenaikan muka air laut. Berdasarkan laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) *Sixth Assessment Report*, kenaikan suhu permukaan Bumi telah meningkat sebesar $1,1^{\circ}\text{C}$ pada tahun 1970-an dibandingkan

dengan masa sebelum revolusi industri (sebelum tahun 1880-an). Suhu permukaan Bumi yang meningkat mengakibatkan pemanasan global, yang berpengaruh terhadap kenaikan muka air laut dan mencairnya gletser (Raper & Braithwaite, 2006). Mencairnya gletser memiliki kontribusi positif tertinggi sebesar 52% terhadap kenaikan muka air laut di seluruh dunia melalui kenaikan massa air laut (*mass-related sea level rise*). Hilangnya massa lapisan es di seluruh dunia merupakan kontributor terbesar terjadinya kenaikan muka air laut dari tahun 2006—2018 (IPCC, 2023).

Estimasi dari respons yang diberikan oleh gletser terhadap perubahan iklim adalah salah satu parameter dasar yang perlu dihitung dan diketahui, khususnya pada wilayah yang dinamis seperti area tropis. Gletser tropis lebih rawan terhadap pemanasannya Bumi karena biasanya berada di



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

lokasi yang tinggi, sebuah area dengan kondisi glasiasi yang khusus (Kaser, 1999). Indonesia memiliki satu-satunya gletser di Asia Tenggara, terletak di Pegunungan Jayawijaya pada koordinat geografis 4,083° Lintang Selatan dan 137,167° Bujur Timur dengan ketinggian 4.884 meter di atas permukaan laut (Permana dkk., 2019). Kondisi unik ini membuat penelitian untuk memahami efek perubahan iklim pada perubahan luas gletser tropis menjadi sangat penting. Gletser di pegunungan tersebut terdapat di beberapa lokasi seperti Carstensz, East Northwall Firn, West Northwall Firn, Southwall Hanging, dan Meren (Veettil & Wang, 2018). Gletser di Pegunungan Jayawijaya mulai mengalami penyusutan pada tahun 1850, dari yang awalnya memiliki luasan 19 km², pada tahun 2005 menjadi hanya 1,8 km² (Permana, 2015). Berdasarkan penelitian Veettil & Wang (2018), gletser tropis di Pegunungan Jayawijaya telah mencair antara tahun 1988 hingga tahun 2015, dari luas awal 3,85 km² menjadi 0,58 km². Laju penyusutan gletser hampir linier dan diperkirakan jika laju penyusutan tahun 1988—2015 terus berlanjut, cakupan gletser di Pegunungan Jayawijaya akan menghilang pada tahun 2020. Veettil & Wang (2018) juga menyebutkan perubahan luas gletser yang signifikan tersebut dipengaruhi oleh beberapa variasi iklim seperti suhu udara, kelembaban relatif, pola iklim dan anomalnya, serta curah hujan.

Penelitian yang dilakukan Permana dkk. (2019) menyatakan sejak tahun 2010 sampai 2018 lapisan dan ketebalan gletser di Pegunungan Jayawijaya terus berkurang. Perhitungan lapisan dan ketebalan gletser tersebut berasal dari data *ice core* atau sampel inti es yang diambil dari lapisan gletser. Data dari *ice core* menunjukkan penyusutan gletser diperparah karena adanya El Nino yang sangat kuat pada tahun 2015—2018 dengan kecepatan penyusutan yang terjadi sebesar 5,4 kali lipat sejak tahun 2010. Hal tersebut menunjukkan bahwa

pengaruh mencairnya gletser yang terjadi karena sistem iklim ENSO dan pemanasan suhu permukaan Bumi secara global (Permana dkk., 2019). Tren positif yang signifikan juga terlihat pada suhu udara di Pegunungan Jayawijaya tahun 1985—2015 yaitu sekitar 0,009°C per tahun (Veettil & Wang, 2018). Hal tersebut membuat anggapan bahwa penyusutan gletser di Pegunungan Jayawijaya dipengaruhi oleh variasi iklim, terutama kenaikan suhu udara.

Kemajuan teknologi satelit dan metodenya untuk mendeteksi dan menganalisis area gletser dapat memberikan pemahaman mengenai perubahan temporal pada luasan gletser tanpa melakukan pengecekan lapangan secara rutin. Citra satelit mampu memetakan wilayah salju melalui metode *Normalized Difference Snow Index* (NDSI), seperti yang dilakukan di Pegunungan Himalaya (Scherler dkk., 2011), Andes (Vuille dkk., 2008), Swiss (Huggel dkk., 2002) dan Greenland (Joughin dkk., 2004) dengan hasil yang baik dan sesuai dengan data lapangan. Metode NDSI dapat digunakan dikarenakan salju memiliki daya serap yang tinggi (reflektansi rendah) pada *Short Wave Infrared* (SWIR) dan sangat reflektif pada panjang gelombang tampak (Stillinger dkk., 2023). Hanya saja, penelitian-penelitian tersebut belum menggunakan gletser di area tropis sebagai lokasi yang digunakan, masih berfokus pada gletser di Eropa dan Asia Tengah. Selain itu, beberapa penelitian sudah menggunakan *platform* berbasis *cloud* (Munawaroh dkk., 2023) dan di bagian Papua lainnya (Schaduw, 2019). Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengamati perubahan luas gletser di Pegunungan Jayawijaya dari tahun 1995—2023 menggunakan citra satelit Landsat dan menganalisis hubungannya dengan perubahan iklim sebagai pengisi ruang yang kosong tersebut. Informasi tersebut dilakukan untuk mendapatkan pengetahuan yang lebih baik tentang interaksi iklim dan gletser di Pegunungan

Tabel 1. Data Penelitian Citra Satelit Landsat

Citra Satelit	Tanggal Akuisisi Data
Landsat 5 TM	18/07/1995
	18/04/1997
	08/07/2003
	14/10/2004
	11/06/2005
Landsat 7 ETM+	04/10/2006
	16/05/2010
	13/03/2010
	15/06/2021
Landsat 8 OLI/TIRS	01/07/2021
	02/07/2014
	09/07/2015
	19/09/2018
Landsat 9 OLI-2/TIRS-2	19/05/2020
	30/09/2022
	05/06/2023

Tabel 2. Data Iklim Global

Produk Data	Tahun Akuisisi Data
<i>Global Mean Surface Temperature (GMST)</i>	1850—2020
<i>Global Mean Sea Level (GMSL)</i>	1901—2018

Jayawijaya. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam proses untuk memahami kondisi terkini dari gletser tropis di Pegunungan Jayawijaya juga sebagai usaha untuk lebih memahami koneksi dan keterkaitan antara perubahan iklim dan efeknya terhadap keseimbangan ekosistem di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Pegunungan Jayawijaya, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua Tengah. Gletser di Pegunungan Jayawijaya terletak cukup dekat dengan area pertambangan emas di Distrik Tembagapura, khususnya Tambang Ertsberg dan Grasberg. Batas wilayah studi ditandai dengan *Region of Interest (ROI)* berupa kotak kuning pada **Gambar 1**.

Data

Penelitian ini menggunakan *Google Earth Engine* untuk mengakses data citra satelit Landsat dari *United States Geological Survey (USGS)* dan mengolah data citra satelit. Data tersebut dapat diakses secara *cloud*, tanpa harus mengunduh data ke komputer pengguna. Citra satelit Landsat memiliki resolusi spasial 30 meter. Data citra satelit diambil berdasarkan ketersediaan data yang ada dari tahun 1995—2023 dengan tutupan awan di bawah 61,1%. Kriteria batasan atas tutupan awan sebesar 61,1% dipilih dalam satu *scene* citra dengan catatan bahwa lokasi kajian tidak terhalang oleh tutupan awan. Data citra satelit Landsat dan tanggal akuisisi ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Data iklim yang digunakan merupakan data iklim global terdiri dari *Global Mean Surface Temperature* dan *Global Mean*

Sea Level yang dapat diakses melalui CEDA Archive Web Browser pada situs web (<https://data.ceda.ac.uk/>). Bentuk data ini merupakan data tabular. Rincian mengenai data iklim yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada **Tabel 2**.

Data iklim yang digunakan menyesuaikan tahun akuisisi data citra Landsat yang digunakan dalam penelitian. Namun, karena data kenaikan muka air laut dan kenaikan suhu permukaan Bumi tidak tersedia sejak tahun 2018 dan 2020 hingga tahun 2023, maka data-data tersebut dilakukan ekstrapolasi atau peramalan. Metode ekstrapolasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah fungsi FORECAST.ETS pada aplikasi pengolah angka. Fungsi ini dapat menghitung atau memperkirakan nilai berdasarkan nilai yang sudah ada menggunakan algoritma *Exponential Triple Smoothing (ETS)* (Xie dkk., 2022) yang ditampilkan pada **Persamaan 1**, dengan parameter F_{t+m} sebagai peramalan pada waktu t ditambah dengan periode m yang merupakan penjumlahan dari observasi S_t dan tren b_t dengan pengaruh musim (*season*) sebagai I_t . Nilai yang diperkirakan adalah lanjutan nilai riwayat dalam tahun target yang ditentukan.

$$F_{t+m} = (S_t + mb_t)I_{t-L+m} \quad (1)$$

Pengolahan Citra Satelit Landsat

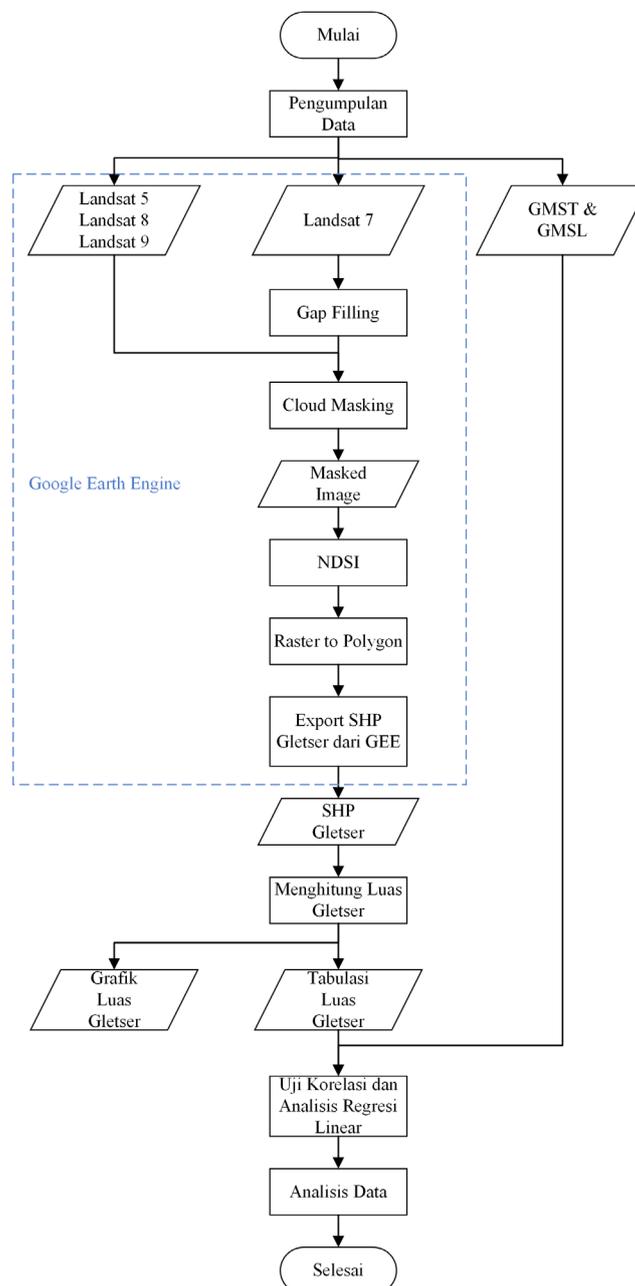
Penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan, yaitu *pre-processing* data, selanjutnya melakukan klasifikasi NDSI pada citra satelit Landsat, menghitung luas gletser, kemudian melakukan uji korelasi dan analisis regresi linier sederhana. Pengolahan data citra dari awal pengaksesan data citra, *pre-processing*, hingga klasifikasi NDSI dilakukan menggunakan *Google Earth Engine*. Adapun diagram alir pelaksanaan penelitian dapat dilihat melalui diagram alir pada **Gambar 2**.

Tahap *pre-processing* merupakan tahap pertama sebelum melakukan klasifikasi NDSI. *Gap filling* dilakukan pada citra satelit Landsat 7 karena citra tersebut memiliki kerusakan sensor. *Gap filling* dilakukan dengan menggabungkan dua data citra di tahun yang sama untuk menutup *gap* tersebut. Selanjutnya, melakukan *cloud masking* untuk menghilangkan tutupan awan di sekitar objek pengamatan. Awan memiliki karakteristik reflektan dan albedo yang sama dengan salju dengan rentang nilai -0,4 hingga 0,4 (Zhu & Woodcock, 2014) sehingga proses pencarian akan awan akan mengurangi kemampuan optis satelit untuk mendeteksi salju terutama di wilayah pegunungan (Stillingier dkk., 2023). Oleh sebab itu, perlu dilakukan *cloud masking* agar pada saat pengaplikasian klasifikasi NDSI, tutupan awan tidak mempengaruhi hasil klasifikasi. Proses *cloud masking* dilakukan menggunakan *mask* yang dihitung dari kanal (*band*) khusus awan pada Landsat 8 dan 9 serta untuk misi Landsat sebelumnya menggunakan model awan yang disediakan (Nadzir dkk., 2020). *Image masked* merupakan hasil citra yang sudah dilakukan *cloud masking* sehingga terbebas dari tutupan awan.

Setelah citra sudah terbebas dari tutupan awan dan bayangan awan, dilakukan klasifikasi gletser dengan metode NDSI. *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) merupakan metode klasifikasi pada citra multispektral menggunakan teknik rasio band untuk memetakan area tutupan salju (Stillingier dkk., 2023) yang ditampilkan pada **Persamaan 2**.

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \tag{2}$$

NDSI memiliki rentang nilai -1 sampai dengan 1. Nilai kurang dari 0 mengklasifikasi wilayah bukan salju, dan nilai lebih besar daripada 0 mengklasifikasi wilayah salju (Poussin dkk., 2023). Hasil klasifikasi salju atau gletser yang didapatkan selanjutnya diubah menjadi vektor, dan di-*export* dalam bentuk *shapefile* (SHP). Setelah didapatkan SHP gletser, dilakukan perhitungan luas gletser menggunakan Aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk melakukan tabulasi



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

data. Hasil tabulasi data luas gletser selanjutnya dilakukan uji korelasi dan model *fitting* regresi linier sebagai tahap akhir analisis data sekaligus melakukan proses penyajian hasil.

Uji Korelasi dan Analisis Regresi Linear Sederhana

Korelasi dilakukan untuk menggolongkan kuat atau lemahnya hubungan yang diukur antara nilai koefisien 0 sampai dengan 1 (Asuero dkk., 2006). Korelasi mempunyai kemungkinan pengujian hipotesis dua arah (*two tailed*). Korelasi searah jika nilai koefisien korelasi ditemukan positif; sebaliknya jika nilai koefisien korelasi negatif, korelasi disebut tidak searah (Zhou dkk., 2022). Uji korelasi antar variabel tidak harus saling bergantung, namun setiap variabel yang dioperasikan tetap harus mempunyai hubungan yang relevan (Edelmann dkk., 2021; Simarmata dkk., 2022). Tingkat hubungan variabel diklasifikasikan dalam **Tabel 3**.

Setelah uji korelasi, dilakukan analisis regresi linier. Analisis regresi adalah teknik statistik untuk menyelidiki dan memodelkan hubungan antar variabel. Persamaan regresi hanya merupakan perkiraan dari hubungan fungsional yang sebenarnya antara variabel-variabel yang diamati. Model regresi linier sederhana adalah model dengan satu regressor x yang memiliki hubungan dengan respon y berupa garis lurus (Montgomery dkk., 2020). Persamaan regresi linier sederhana

ditulis dalam **Persamaan 3**.

$$Y = a + bX \quad (3)$$

Antar variabel dalam model regresi tidak menyatakan hubungan sebab-akibat. Meskipun terdapat hubungan yang kuat antar variabel, hal tersebut tidak dapat dianggap sebagai bukti bahwa kedua variabel tersebut berhubungan (Roustaei, 2024).

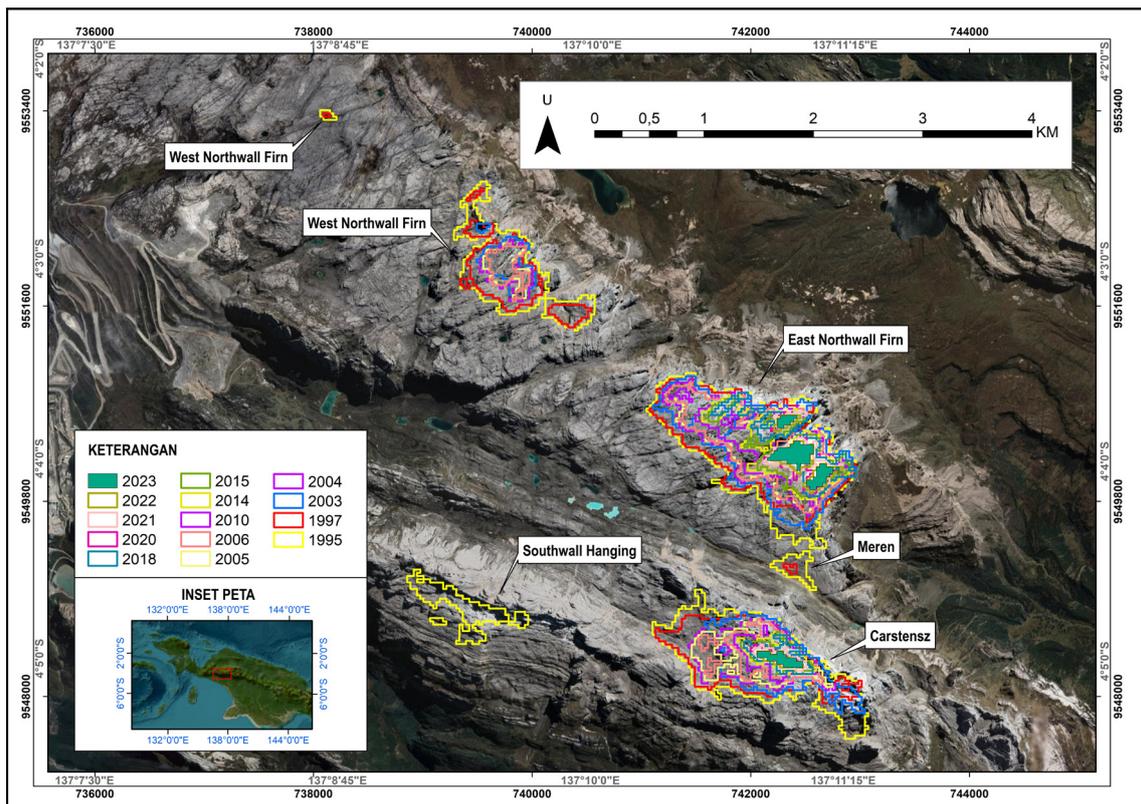
HASIL DAN PEMBAHASAN Perubahan Area Gletser

Pegunungan Jayawijaya memiliki lima lokasi gletser sejak tahun 1995, yaitu West Northwall Firn, East Northwall Firn, Carstenz, Southwall Hanging, dan Meren (Kiyoki dkk., 2024). Namun demikian, gletser di area tersebut mencair secara signifikan sehingga pada tahun 2023 hanya menyisakan sedikit gletser pada lokasi East Northwall Firn dan Carstenz. Perubahan luas gletser ini memberikan pandangan terkait dampak nyata dari perubahan iklim. Berikut ditampilkan peta perubahan area gletser di Pegunungan Jayawijaya untuk memvisualisasikan mencairnya gletser antara tahun 1995—2023 pada **Gambar 3**.

Tabel 3. Interval Koefisien dan Tingkat Hubungan Korelasi

Interval Koefisien (r)	Tingkat Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,000	Sangat Kuat

Sumber: Rosalina dkk. (2023)



Gambar 3. Peta Perubahan Area Gletser

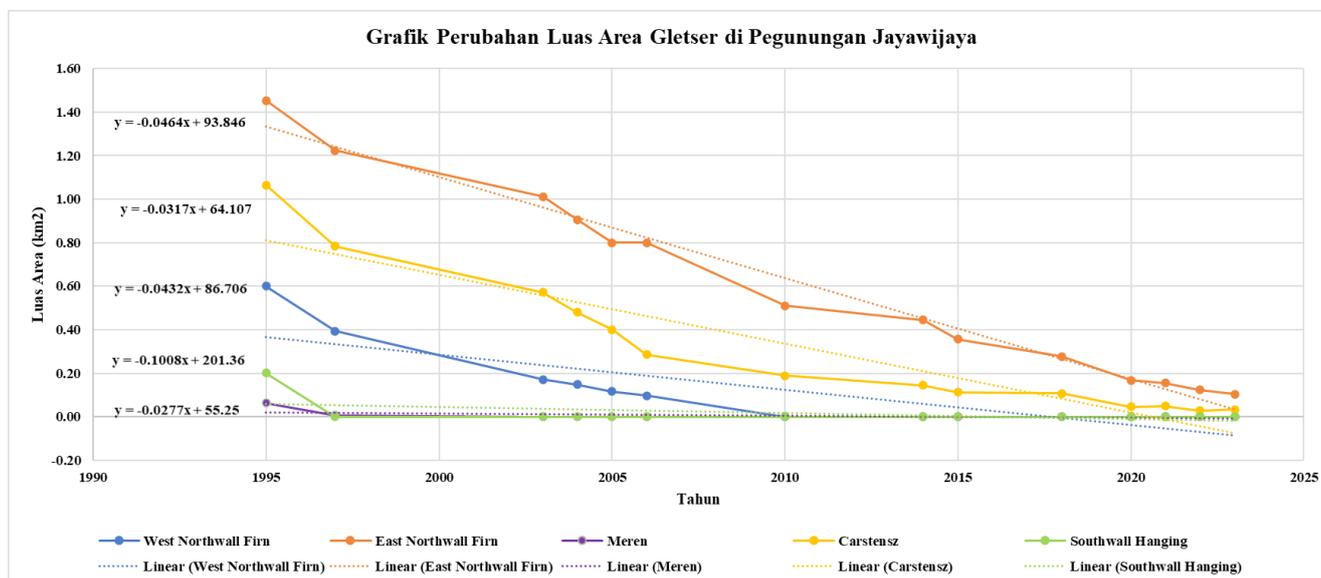
Terlihat dari Gambar 3 bahwa terekam perubahan yang cukup signifikan dari area gletser pada tahun 1995 yang ditandai dengan poligon berwarna kuning dibandingkan dengan area pada tahun 2023 yang ditandai dengan poligon berwarna hijau serta terlihat pula dinamika secara luasan pada rentang tahun-tahun antara tersebut. Secara visual terlihat bahwa gletser di Southwall Hanging terakhir tercatat pada tahun 1995, Meren terakhir tercatat pada tahun 1997, serta West Northwall Firn terakhir terlihat pada data tahun 2006. Berdasarkan hasil klasifikasi NDSI, luas keseluruhan gletser pada tahun 1995 sebesar 3,39 km² dan mencair hingga pada tahun 2023 luasnya hanya 0,14 km² atau sebesar 4%. Sejak tahun 1995, gletser di Pegunungan Jayawijaya telah menghilang sebanyak 3,26 km² atau sebesar 96% pada tahun 2023. Perhitungan luas gletser di Pegunungan Jayawijaya ditampilkan dalam Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4 di atas, tahun 1995 gletser masih bisa ditemui pada kelima lokasi tersebut. Secara luasan, kehilangan gletser pertama kali terjadi pada tahun 1997, yaitu gletser di lokasi Southwall Hanging. Penyusutan terus terjadi hingga akhirnya gletser di lokasi Meren menghilang pada tahun 2003. Namun, kehilangan gletser di Meren bisa saja terjadi pada antara tahun 1998 sampai dengan tahun 2002. Hal ini dikarenakan luas gletser Meren pada tahun 1997 sudah sangat kecil yaitu 0,01 km². Tidak adanya ketersediaan data pada tahun 1998 sampai dengan tahun 2002 menyebabkan tahun menghilangnya gletser Meren tidak dapat dipastikan. Penyusutan gletser terus berlanjut disusul dengan menghilangnya gletser pada puncak West Northwall Firn di tahun 2010 yang bisa saja terjadi dari tahun 2006 sampai 2009. Secara statistik, grafik dan tren penurunan gletser dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 4. Luas Area Gletser di Pegunungan Jayawijaya pada Tahun 1995—2023

Tahun	Luas Area Gletser di Pegunungan Jayawijaya (km ²)					Luas Total (km ²)	Total Kehilangan Gletser	
	West Northwall Firn	East Northwall Firn	Meren	Carstenz	Southwall Hanging		Km ²	%
1995	0,61	1,45	0,06	1,06	0,20	3,39		
1997	0,39	1,22	0,01	0,78	0,00	2,41		
2003	0,17	1,01	0,00	0,57	0,00	1,75		
2004	0,15	0,91	0,00	0,48	0,00	1,53		
2005	0,12	0,80	0,00	0,40	0,00	1,32		
2006	0,10	0,80	0,00	0,29	0,00	1,18		
2010	0,00	0,51	0,00	0,19	0,00	0,70	3,26	95,95
2014	0,00	0,45	0,00	0,14	0,00	0,59		
2015	0,00	0,36	0,00	0,11	0,00	0,47		
2018	0,00	0,28	0,00	0,11	0,00	0,38		
2020	0,00	0,17	0,00	0,05	0,00	0,21		
2021	0,00	0,16	0,00	0,05	0,00	0,21		
2022	0,00	0,12	0,00	0,03	0,00	0,15		
2023	0,00	0,10	0,00	0,03	0,00	0,14		

Sumber: Hasil Analisis Data (2025)



Gambar 4. Grafik Perubahan Area Gletser di Pegunungan Jayawijaya Tahun 1995—2023

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa laju penyusutan gletser Southwall Hanging memiliki laju penyusutan tercepat sebesar 0,101 km²/tahun. Hal ini dikarenakan lokasi gletser hanya ada di tahun 1995 dan di tahun pengamatan berikutnya tahun 1997 gletser tersebut menghilang. Dua lokasi lain yang gletsernya telah menghilang, yaitu West Northwall Firn dan Meren masing-masing memiliki laju penyusutan sebesar 0,043 km²/tahun dan 0,028 km²/tahun. Sedangkan dua lokasi yang masih memiliki gletser yaitu East Northwall Firn dan Carstenz masing-masing memiliki laju penyusutan sebesar 0,047 km²/tahun dan 0,032 km²/tahun. Penelitian terdahulu di Pegunungan Jayawijaya yang berbasis citra satelit IKONOS (Klein & Kincaid, 2006) menunjukkan bahwa pada tahun 2002, tersisa East Northwall Firn, West Northwall Firn dan Carstenz dengan luasan yang mirip, yaitu 1,228 km², 0,351 km², dan 0,747 km². Hasil ini cukup selaras dengan penelitian yang dilakukan di Kolombia (Ceballos dkk., 2006; Poveda & Pineda, 2009), Andes (Rabatel dkk., 2013), Peru (Seehaus dkk., 2019), Kenya (Hastenrath, 1995) dan Tibet (Sun dkk., 2022), yaitu sama-sama memiliki nilai kecepatan penyusutan yang positif sebesar ~0,05 km²/tahun.

Saat ini, gletser di East Northwall Firn luasnya hanya tersisa 0,10 km². Sedangkan gletser di Carstenz luasnya tersisa 0,03 km². Perubahan luas gletser yang terjadi sangat cepat, bahkan dengan persentase kehilangan diatas 90% dalam kurun waktu 28 tahun terakhir. Jika laju penyusutan gletser di Pegunungan Jayawijaya terus berlanjut, gletser di Pegunungan Jayawijaya akan menghilang tidak lama lagi. Apabila laju penyusutan dari

gletser yang ditemukan masih sama dan tidak berubah, gletser-gletser di Pegunungan Jayawijaya diprediksi akan menghilang pada tahun 2024. Prediksi ini dihitung menggunakan fungsi *forecast* linier untuk menghitung prediksi luas gletser di masa depan berdasarkan data historis luas gletser sebelumnya. Perhitungan luas yang diprediksi menggunakan fungsi ETS ditampilkan dalam **Tabel 5**.

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai prediksi luas gletser pada tahun 2024 ditemukan bernilai kurang dari 0 atau mencapai 0. Dengan demikian, dalam kata lain, gletser di Pegunungan Jayawijaya diprediksi akan hilang pada tahun 2024. Penelitian lain yang sedang dalam proses *review* (Ibel dkk., 2025) menunjukkan bahwa dari data satelit Pléiades pada tahun 2023 dan 2024 ditemukan luas gletser total sebesar 0,165 km² dengan prediksi bahwa seluruh gletser akan hilang pada tahun 2030.

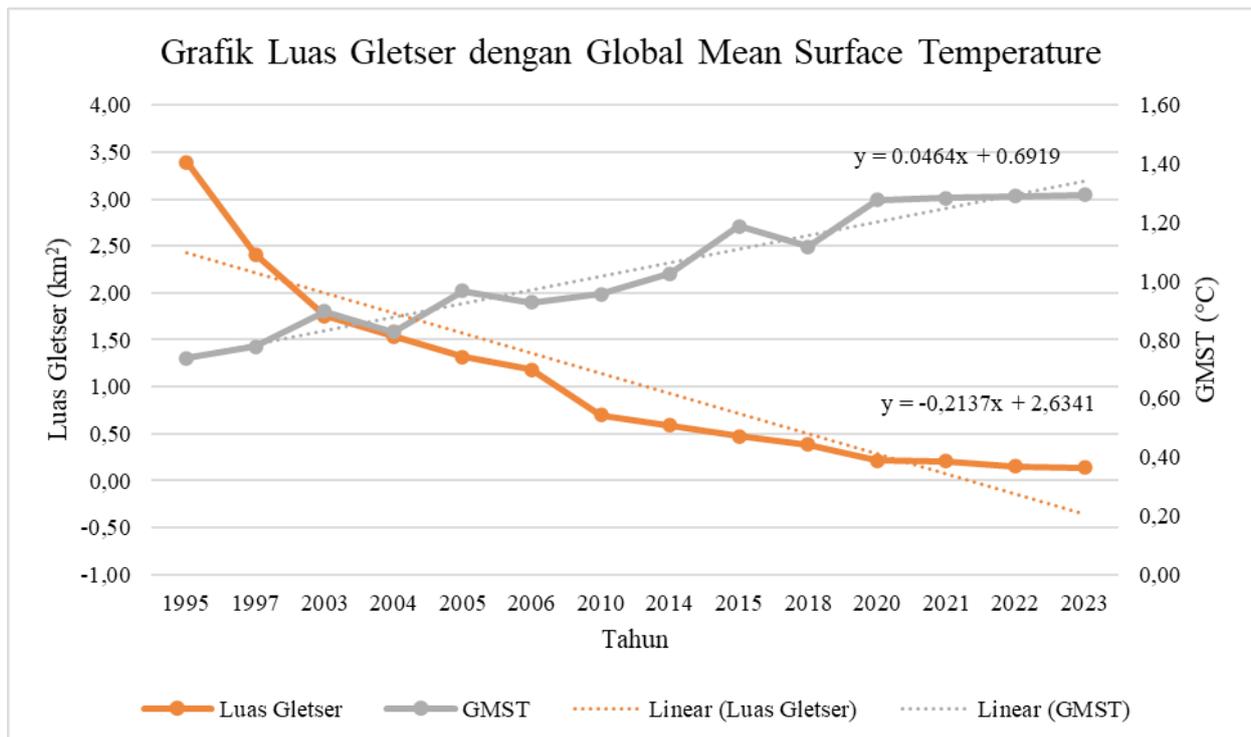
Hubungan Antara Mencairnya Gletser dengan Perubahan Iklim

Penurunan luas gletser di Pegunungan Jayawijaya, seperti dengan perubahan luasan gletser di lokasi lain (Bliss dkk., 2014; Luo dkk., 2020), secara signifikan berkorelasi dengan perubahan iklim global yang sedang terjadi. Perubahan iklim dapat dilihat melalui dua indikator utama, yaitu kenaikan suhu permukaan Bumi dan kenaikan muka air laut. **Gambar 5 dan Gambar 6** menampilkan grafik antara luas gletser dengan GMST dan grafik antara luas gletser dengan GMSL.

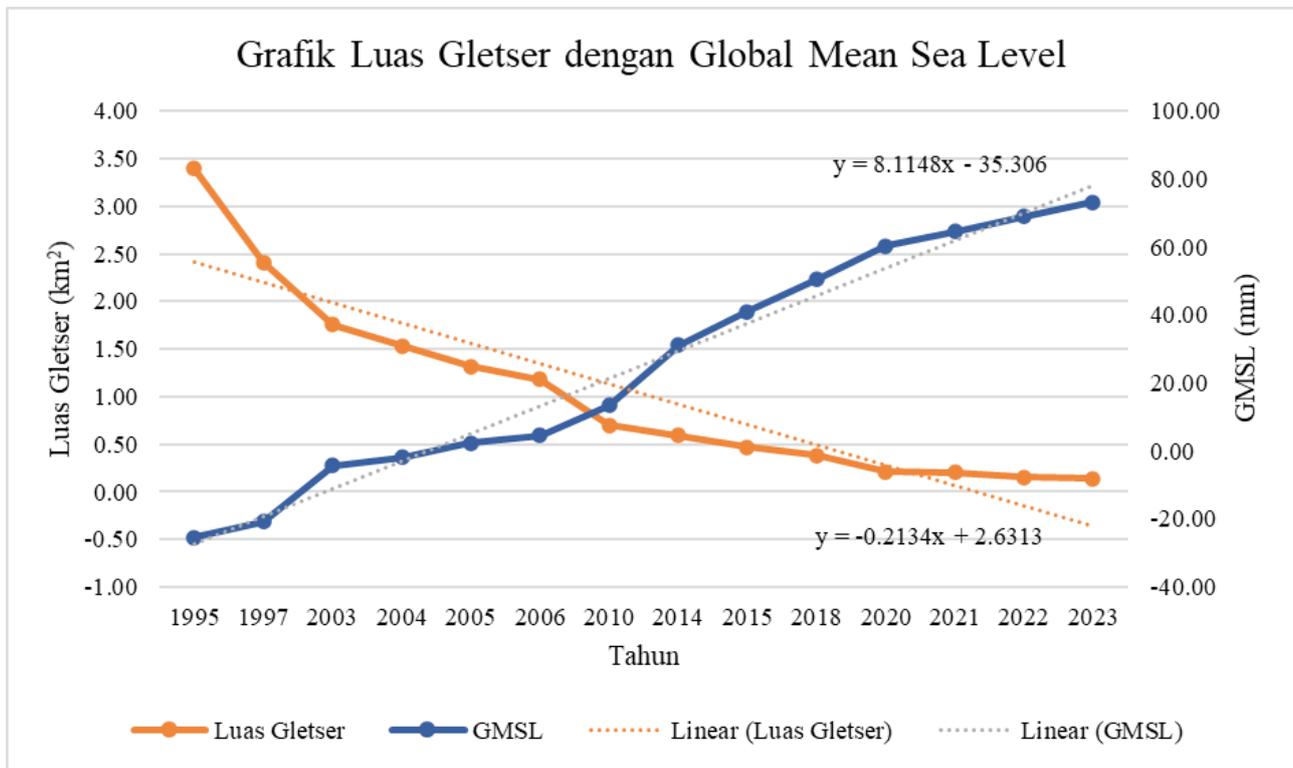
Tabel 5. Prediksi Luas Gletser di Pegunungan Jayawijaya

Tahun	Luas Gletser (km ²)		
	East Northwall Firn	Carstenz	Total Area
2024	-0,01	-0,11	-0,25

Sumber: Hasil Analisis Data (2025)



Gambar 5. Grafik Antara Luas Gletser dengan *Global Mean Surface Temperature*



Gambar 6. Grafik Antara Luas Gletser dengan Global Mean Sea Level

Gambar 5 dan Gambar 6 memperlihatkan grafik akan hubungan dari perubahan luas gletser dengan *Global Mean Surface Temperature* (GMST) dan luas gletser dengan *Global Mean Sea Level* (GMSL). Ditemukan bahwa dari tahun 1995—2023, tren kenaikan GMST diestimasikan sebesar 0,046°C/tahun, tren kenaikan GMSL adalah 8,114 mm/tahun, dan tren penurunan luas gletser sebesar 0,213 km²/tahun. Temuan ini mengindikasikan bahwa GMST dan GMSL secara konsisten naik dari tahun ke tahun, senada dengan penelitian sebelumnya (Palmer dkk., 2021; Song dkk., 2023). Selain itu, penyusutan gletser Jayawijaya pada tahun 1995-2023 sebesar 0,116 km²/tahun (menyusut 3,4% setiap tahun) ini ditemukan 2,6 kali lebih besar dari penyusutan di Alpen sebesar 1,2% (Paul dkk., 2020) dan 6 kali lebih besar dari penyusutan di Pegunungan Rocky Kanada (Tennant dkk., 2012). Selanjutnya, gletser secara kontinu menyusut seperti di Alaska (Fell dkk., 2017; Hock & Huss, 2021). Dari hasil-hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa peningkatan suhu permukaan Bumi secara global memicu pencairan gletser, perubahan pola cuaca, dan kenaikan muka air laut, yang mana untuk gletser tropis dapat merespons pemanasan secara lebih cepat dibanding lintang tinggi. Untuk mengetahui hubungan ketiga variabel tersebut secara kuantitatif, dilakukan uji korelasi dan analisis regresi linier sederhana.

Uji Korelasi Antara Perubahan Luas Gletser dengan Perubahan Iklim

Uji korelasi dilakukan untuk memahami hubungan antara variabel berdasarkan tingkat dan arah hubungannya. Uji korelasi dilakukan sebanyak dua kali, yaitu antara luas gletser sebagai variabel Y dengan GMST sebagai variabel X, dan luas gletser sebagai variabel Y dengan GMSL sebagai variabel X. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa masing-masing nilai koefisien dari uji korelasi yang dilakukan memiliki nilai koefisien -0,89 untuk GMST dan -0,90 untuk

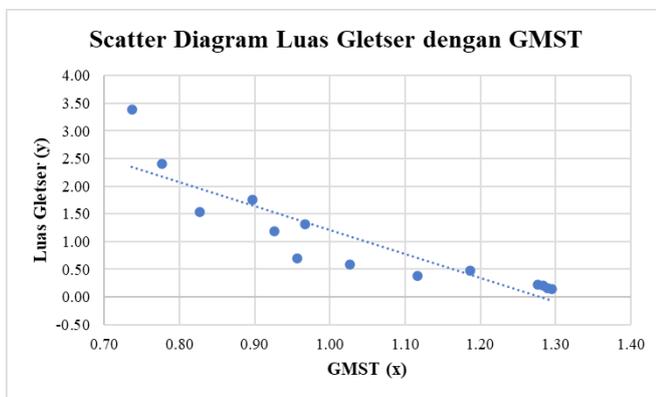
GMSL. Hal tersebut menunjukkan hasil korelasi keduanya berada pada tingkat hubungan sangat tinggi dengan arah korelasi berlawanan. Artinya, jika variabel X mengalami kenaikan, maka variabel Y mengalami penurunan. Hasil arah korelasi ini sesuai dengan grafik pada Gambar 5 dan Gambar 6. Temuan ini menunjukkan bahwa tidak hanya memiliki pola yang berkebalikan antara muka air laut global, suhu permukaan tanah global dengan luasan gletser, tetapi memiliki korelasi atau hubungan yang sangat kuat, mendekati 1 seperti yang ditemukan oleh penelitian sebelumnya (Bolch, 2007; Roe dkk., 2017; Wang dkk., 2013). Korelasi yang sangat kuat ini dapat menjadi indikator awal bahwa perubahan iklim yang mayoritas disebabkan oleh kegiatan manusia memiliki pengaruh akan menyusutnya gletser tropis di Pegunungan Jayawijaya.

Analisis Regresi Linear Antara Luas Gletser dengan Perubahan Iklim

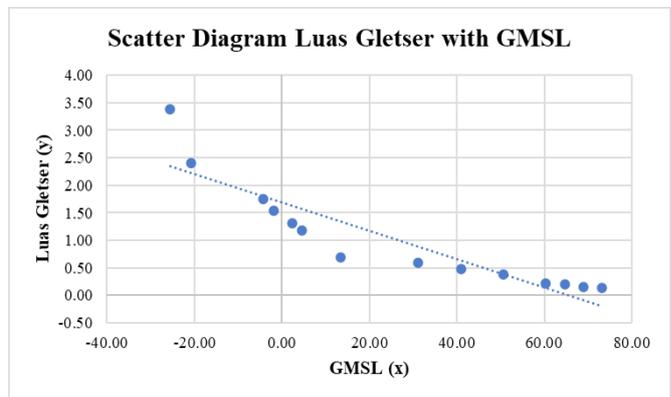
Analisis regresi linier dilakukan untuk membangun model hubungan antara luas gletser dengan GMST dan GMSL. Model regresi yang dipakai dalam penelitian ini adalah model regresi linier sederhana, yaitu model persamaan dengan satu variabel x sebagai prediktor yang memiliki hubungan dengan variabel y sebagai variabel respon dalam satu garis lurus. Tujuan dari proses analisis regresi ini adalah untuk melihat signifikansi dan hubungan antara perubahan luasan gletser dengan parameter perubahan iklim, juga untuk menghitung luasan gletser baik ke masa lalu dan ke masa depan berdasarkan nilai GMSL dan GMST di tahun-tahun tertentu. Analisis regresi ini dilakukan sebanyak dua kali, yaitu antara luas gletser sebagai variabel Y dengan GMST sebagai variabel X, dan luas gletser sebagai variabel Y dengan GMSL sebagai variabel X. **Tabel 8** dan **Gambar 7** di bawah ini menunjukkan data GMST, GMSL, luas gletser dan *scatter diagram* model fitting regresi linier yang dilakukan.

Tabel 8. Data GMST, GMSL, dan Luas Gletser Tahun 1995–2023

Tahun	GMST (°C)	GMSL (mm)	Luas Gletser (km ²)
1995	0,74	-25,48	3,39
1997	0,78	-20,69	2,41
2003	0,90	-4,27	1,75
2004	0,83	-1,87	1,53
2005	0,97	2,43	1,32
2006	0,93	4,54	1,18
2010	0,96	13,41	0,70
2014	1,03	31,05	0,59
2015	1,19	40,95	0,47
2018	1,12	50,55	0,38
2020	1,28	60,34	0,21
2021	1,28	64,64	0,21
2022	1,29	68,93	0,15
2023	1,29	73,23	0,14



(a)



(b)

Gambar 7. (a) *Scatter Diagram* Antara Luas Gletser dan GMST, dan (b) *Scatter Diagram* Antara Luas Gletser dan GMSL

Gambar 7 (a) dan (b) di atas merupakan *scatter diagram* antara luas gletser dengan GMST dan GMSL, yang di plot berdasarkan tabulasi data pada Tabel 8 di atas. Dari model fitting pada Gambar 7 (a) di atas, didapatkan persamaan yang ditulis pada **Persamaan 4**:

$$y = 5,541 - 4,337 x \#(4)$$

Dari model fitting pada Gambar 7 (b) di atas, didapatkan persamaan yang ditulis pada **Persamaan 5**:

$$y = 1,688 - 0,0257 x \#(5)$$

Model regresi linier pada persamaan 4 dan persamaan 5 di atas senada dengan penelitian dari (Bonanno dkk., 2014) yang menggunakan dan menemukan persamaan dari regresi linier untuk lalu dihitung skenario-skenario di masa depan. Dua persamaan dia atas lalu digunakan untuk membuat estimasi luas gletser sebelum tahun 1995 serta membuat skenario-skenario di masa depan. **Tabel 9** di bawah ini merupakan hasil dari estimasi luas gletser berdasarkan model regresi GMST dan model regresi GMSL.

Berdasarkan Tabel 9., terlihat bahwa hasil estimasi luas gletser menggunakan model regresi GMST mengalami kenaikan dari tahun 1988 ke 1993. Hasil estimasi tersebut mengalami perbedaan dengan hasil estimasi dengan model regresi GMSL yang mana seluruh hasil estimasinya mengalami penurunan luas gletser. Hal ini dikarenakan GMST mengalami kenaikan suhu di tahun 1988 dan suhu turun kembali di tahun 1993. Hasil penelitian ini terbatas pada penggunaan dua variabel pada model fitting regresi linier sederhana, sehingga hasil estimasi luas gletser akan sangat bergantung pada nilai naik atau turunnya suhu. Nilai estimasi yang dihasilkan kemudian dibandingkan hasilnya penelitian terdahulu. Hasil estimasi tersebut dibandingkan dengan penelitian milik Veettil & Wang (2018) untuk menganalisis perbedaan luas pada tahun 1988 dan 1993, ditampilkan pada **Tabel 10**.

Tabel 10 menunjukkan perbedaan estimasi luas gletser di tahun 1988 dan 1993 dengan hasil klasifikasi dari penelitian Veettil & Wang (2018). Jika dibandingkan, estimasi luas gletser tahun 1988 antara model regresi GMST dan GMSL tidak jauh berbeda. Hanya berbeda 0,03 km² atau sekitar 1,08%. Perbedaan hasil estimasi keduanya dengan hasil klasifikasi Veettil & Wang sekitar 1 km² atau 27%. Namun, terjadi perbedaan yang signifikan antara hasil estimasi luas gletser model regresi GMST dan GMSL. Perbedaan kedua

Tabel 9. Estimasi Luas Gletser Berdasarkan Model Regresi Linear

Tahun	GMST (°C)	GMSL (mm)	Estimasi Luas Gletser (km ²)	
			Model Regresi GMST	Model Regresi GMSL
1950	0,13	-87,52	4,99	3,94
1970	0,27	-69,99	4,38	3,49
1980	0,56	-52,86	3,13	3,05
1988	0,64	-43,77	2,78	2,81
1993	0,53	-29,89	3,26	2,46

Sumber: Hasil Analisis Data (2025)

Tabel 10. Perbandingan Luas Gletser di Pegunungan Jayawijaya Tahun 1988 dan 1995

Tahun	Sumber Data Luas Gletser (km ²)			Perbandingan Persentase Rata-Rata Perbedaan Luas Gletser (km ²)					
	VW	R-GMST	R-GMSL	VW & R-GMST		VW & R-GMSL		R-GMST & R-GMSL	
				km ²	%	km ²	%	km ²	%
1988	3,85	2,78	2,81	1,07	27,79	1,04	27,01	0,03	1,08
1993	3,01	3,26	2,46	0,25	8,31	0,55	18,27	0,80	24,54

Sumber: Hasil Analisis Data (2025)

hasil estimasi tersebut mencapai 24,54%. Hasil perbandingan ini menunjukkan bahwa model regresi linier sederhana memiliki keterbatasan dalam memodelkan hubungan non-linier. Penggunaan model fitting lain yang lebih kompleks yang bisa digunakan diantaranya adalah polinomial orde 2 atau orde 3 dan eksponensial karena model ini lebih unggul dalam fleksibilitas pemodelan dalam memodelkan hubungan non-linier, seperti penelitian (Li dkk., 2019; Zhao dkk., 2024). Selain itu, penggunaan hasil regresi linier ini untuk skenario di masa depan menunjukkan hasil yang sama dengan sebelumnya, yaitu gletser di Jayawijaya akan hilang di tahun 2024.

KESIMPULAN

Pegunungan Jayawijaya memiliki lima lokasi gletser pada tahun 1995, yaitu West Northwall Firn, East Northwall Firn, Southwall Hanging, Meren, dan Carstensz. Penyusutan gletser tersebut terus terjadi hingga akhirnya pada tahun 2023 hanya tersisa dua lokasi gletser, yaitu East Northwall Firn dan Carstensz. Lokasi gletser Southwall Hanging, Meren, dan West Northwall Firn masing-masing menghilang pada tahun 1997, 2003, dan 2010. Secara total, luas gletser di Pegunungan Jayawijaya pada tahun 1995 adalah 3,39 km² hingga pada tahun 2023 luas gletser hanya sebesar 0,14 km². Kehilangan gletser sebesar 3,26 km² kurang dari tiga dekade atau sebesar 95,95% dengan laju rata-rata kehilangan sebesar 0,116 km²/tahun yang mana 2,8 dan 6 kali lebih cepat penyusutannya daripada gletser di lintang tinggi. Saat ini, gletser di Pegunungan Jayawijaya hanya tersisa 4,05% saja dari keseluruhan. Tren penurunan luas gletser ini akan terus berlanjut dan diprediksikan semua gletser di Pegunungan Jayawijaya akan menghilang pada tahun 2024.

Lebih lanjut, hasil uji korelasi menunjukkan bahwa data GMST dan GMSL memiliki tingkat korelasi sangat tinggi dengan nilai koefisien sebesar -0,89 dan -0,90. Arah korelasi keduanya merupakan arah korelasi negatif atau berlawanan, yang berarti semakin tinggi suhu permukaan Bumi dan kenaikan muka air laut, maka semakin menurun

luas gletsernya. Hasil estimasi gletser dengan hasil penelitian terdahulu ditemukan perbedaan sebesar 27% pada tahun 1988 dan 8%-18% pada tahun 1993. Hasil estimasi antara model regresi GMST dengan GMSL memiliki kemiripan pada tahun 1988 dengan perbedaan sebesar 1%. Namun, ditemukan perbedaan yang cukup signifikan pada tahun 1993 sebesar 24,54%. Perbedaan hasil estimasi dalam penelitian ini menunjukkan keterbatasan penggunaan model regresi linier sederhana yang hanya menggunakan dua variabel pengamatan dan memiliki keterbatasan dalam memodelkan hubungan non-linier antara variabel-variabel tersebut.

Prediksi akan hilangnya salah satu sisa terakhir gletser tropis di Indonesia pada tahun 2024 ini mempertegas percepatan dampak perubahan iklim di wilayah tropis. Selain itu, terdapat risiko lain secara sosial seperti hilangnya arsip paleontologi, perubahan tingkat albedo dan potensi ketidakstabilan lereng setelah gletser mencair. Oleh karena itu, usaha dokumentasi berbasis data lapangan dan data satelit resolusi sangat tinggi perlu dilakukan sebagai tindak lanjut yang mana disertai pula dengan pemberian informasi dan komunikasi risiko di tingkat pendidikan dasar dan menengah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih atas dukungan dari seluruh pihak yang mendukung penelitian ini, khususnya pada Institut Teknologi Sumatera yang memberikan dukungan administratif. Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada *reviewer* yang telah memberikan kritik dan saran pada manuskrip dalam penelitian ini. Penelitian ini juga tidak dibiayai oleh sumber pendanaan eksternal.

KONTRIBUSI PENULIS

Mutia Rahma Apriani melakukan pengumpulan data penelitian, melakukan pengolahan data dan membuat draf manuskrip; **Zulfikar Adlan Nadzir** mendesain metode penelitian, menganalisis hasil pengolahan data dan review naskah publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Asuero, A. G., Sayago, A., & González, A. G. (2006). The Correlation Coefficient: An Overview. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 36(1), 41–59. <https://doi.org/10.1080/10408340500526766>
- Bliss, A., Hock, R., & Radić, V. (2014). Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(4), 717–730. <https://doi.org/10.1002/2013JF002931>
- Bolch, T. (2007). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 56(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
- Bonanno, R., Ronchi, C., Cagnazzi, B., & Provenzale, A. (2014). Glacier response to current climate change and future scenarios in the northwestern Italian Alps. *Regional Environmental Change*, 14(2), 633–643. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0523-6>
- Ceballos, J. L., Euscátegui, C., Ramírez, J., Cañon, M., Huggel, C., Haeberli, W., & Machguth, H. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, 43, 194–201. <https://doi.org/10.3189/172756406781812429>
- Edelmann, D., Móri, T. F., & Székely, G. J. (2021). On relationships between the Pearson and the distance correlation coefficients. *Statistics & Probability Letters*, 169, 108960. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2020.108960>
- Fell, S. C., Carrivick, J. L., & Brown, L. E. (2017). The Multitrophic Effects of Climate Change and Glacier Retreat in Mountain Rivers. *BioScience*, 67(10), 897–911. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix107>
- Hastenrath, S. (1995). Glacier recession on Mount Kenya in the context of the global tropics. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 24(3), 633–638. <https://doi.org/10.3406/bifea.1995.1213>
- Hock, R., & Huss, M. (2021). Glaciers and climate change. Dalam *Climate Change* (hlm. 157–176). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00009-8>
- Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W., Teyssie, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. <https://doi.org/10.1139/t01-099>
- Ibel, D., Mölg, T., & Sommer, C. (2025). *Brief communication: Tropical glaciers on Puncak Jaya (Irian Jaya/West Papua, Indonesia) close to extinction*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-415>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report | UNEP - UN Environment Programme*. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Joughin, I., Abdalati, W., & Fahnestock, M. (2004). Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier. *Nature*, 432(7017), 608–610. <https://doi.org/10.1038/nature03130>
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1–4), 93–103. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4)
- Kiyoki, Y., Uraki, A., Sasaki, S., & Chen, Y. (2024). A Time-Series Semantic-Computing Method for 5D World Map System Applied to Environmental Changes. Dalam M. Tropmann-Frick, H. Jaakkola, B. Thalheim, Y. Kiyoki, & N. Yoshida (Ed.), *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/FAIA231147>
- Klein, A. G., & Kincaid, J. L. (2006). Retreat of glaciers on Puncak Jaya, Irian Jaya, determined from 2000 and 2002 IKONOS satellite images. *Journal of Glaciology*, 52(176), 65–79. <https://doi.org/10.3189/172756506781828818>
- Li, Y.-J., Ding, Y.-J., Shangguan, D.-H., & Wang, R.-J. (2019). Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015. *Advances in Climate Change Research*, 10(4), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.03.003>
- Luo, W., Zhang, G., Chen, W., & Xu, F. (2020). Response of glacial lakes to glacier and climate changes in the western Nyainqentanglha range. *Science of The Total Environment*, 735, 139607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139607>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2020). *Introduction to linear regression analysis* (Fifth edition). Wiley.
- Munawaroh, M., Wicaksono, P., & Rudiastuti, A. W. (2023). Pemetaan cepat batimetri perairan dangkal menggunakan citra Sentinel-2 dan Google Earth Engine di Perairan Tanjung Kelayang – Pulau Belitung. *Majalah Geografi Indonesia*, 37(2), Article 2. <https://doi.org/10.22146/mgi.80414>
- Nadzir, Z. A., Simarmata, N., & Aliffia, A. (2020). Pengembangan Algoritma Identifikasi Sawah Padi Berdasarkan Spektra Fase Padi (Studi Kasus: Lampung Selatan) (Paddy Field Identification Algorithm Development Using Spectral Value of Paddy Field (Case Study: South Lampung)). *JURNAL SAINS INFORMASI GEOGRAFIS*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.31314/jsig.v3i1.537>
- Palmer, M. D., Domingues, C. M., Slangen, A. B. A., & Boeira Dias, F. (2021). An ensemble approach to quantify global mean sea-level rise over the 20th century from tide gauge reconstructions. *Environmental Research Letters*, 16(4), 044043. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdac>
- Paul, F., Rastner, P., Azzoni, R. S., Diolaiuti, G., Fugazza, D., Le Bris, R., Nemec, J., Rabatel, A., Ramusovic, M., Schwaizer, G., & Smiraglia, C. (2020). Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2. *Earth System Science Data*, 12(3), 1805–1821. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020>
- Permana, D. S. (2015). *Reconstruction Of Tropical Pacific Climate Variability From Papua Ice Cores, Indonesia*. Ohio: The Ohio State University.
- Permana, D. S., Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Lin, P.-N., Nicolas, J. P., Bolzan, J. F., Bird, B. W., Mikhailenko, V. N., Gabrielli, P., Zagorodnov, V., Mountain, K. R., Schotterer, U., Hanggoro, W., Habibie, M. N., Kaize, Y., Gunawan, D., Setyadi, G., Susanto, R. D., ... Mark, B. G. (2019). Disappearance of the last tropical glaciers in the Western Pacific Warm Pool (Papua, Indonesia) appears imminent. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(52), 26382–26388. <https://doi.org/10.1073/pnas.1822037116>
- Poussin, C., Timoner, P., Chatenoux, B., Giuliani, G., & Peduzzi, P. (2023). Improved Landsat-based snow cover mapping accuracy using a spatiotemporal NDSI and generalized linear mixed model. *Science of Remote Sensing*, 7(February), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100078>
- Poveda, G., & Pineda, K. (2009). Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: Are they bound to disappear during the 2010–2020 decade? *Advances in Geosciences*, 22, 107–116. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-107-2009>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.-E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Raper, S. C. B., & Braithwaite, R. J. (2006). Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature*, 439(7074), 311–313. <https://doi.org/10.1038/nature04448>
- Roe, G. H., Baker, M. B., & Herla, F. (2017). Centennial glacier retreat as categorical evidence of regional climate change. *Nature Geoscience*, 10(2), 95–99. <https://doi.org/10.1038/ngeo2863>
- Roustaie, N. (2024). Application and interpretation of linear-regression analysis. *Medical hypothesis discovery and innovation in ophthalmology*, 13(3), 151–159. <https://doi.org/10.51329/mehdiophthal1506>

- Schaduw, J. N. W. (2019). Struktur Komunitas dan Persentase Penutupan Kanopi Mangrove Pulau Salawati Kabupaten Kepulauan Raja Ampat Provinsi Papua Barat. *Majalah Geografi Indonesia*, 33(1), Article 1. <https://doi.org/10.22146/mgi.34745>
- Scherler, D., Bookhagen, B., & Strecker, M. R. (2011). Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nature Geoscience*, 4(3), 156–159. <https://doi.org/10.1038/ngeo1068>
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, 13(10), 2537–2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Simarmata, N., Nadzir, Z. A., & Agustina, L. K. (2022). Application Of Spot6/7 Satellite Imagery for Rice Field Mapping Based On Transformative Vegetation Indices. *Jurnal Geografi*, 14(1), 69. <https://doi.org/10.24114/jg.v14i1.29036>
- Song, J., Tong, G., Chao, J., Chung, J., Zhang, M., Lin, W., Zhang, T., Bentler, P. M., & Zhu, W. (2023). Data driven pathway analysis and forecast of global warming and sea level rise. *Scientific Reports*, 13(1), 5536. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30789-4>
- Stillinger, T., Rittger, K., Raleigh, M. S., Michell, A., Davis, R. E., & Bair, E. H. (2023). Landsat, MODIS, and VIIRS snow cover mapping algorithm performance as validated by airborne lidar datasets. *Cryosphere*, 17(2), 567–590. <https://doi.org/10.5194/tc-17-567-2023>
- Sun, C., Xu, X., Zhao, T., Yao, T., Zhang, D., Wang, N., Ma, Y., Ma, W., Chen, B., Zhang, S., & Cai, W. (2022). Distinct impacts of vapor transport from the tropical oceans on the regional glacier retreat over the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of The Total Environment*, 823, 153545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153545>
- Tennant, C., Menounos, B., Wheate, R., & Clague, J. J. (2012). Area change of glaciers in the Canadian Rocky Mountains, 1919 to 2006. *The Cryosphere*, 6(6), 1541–1552. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1541-2012>
- Veettil, B. K., & Wang, S. (2018). State and fate of the remaining tropical mountain glaciers in australasia using satellite imagery. *Journal of Mountain Science*, 15(3), 495–503. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4539-0>
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3–4), 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- Wang, X., Siegert, F., Zhou, A., & Franke, J. (2013). Glacier and glacial lake changes and their relationship in the context of climate change, Central Tibetan Plateau 1972–2010. *Global and Planetary Change*, 111, 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.09.011>
- Xie, Y., Jin, M., Zou, Z., Xu, G., Feng, D., Liu, W., & Long, D. (2022). Real-Time Prediction of Docker Container Resource Load Based on a Hybrid Model of ARIMA and Triple Exponential Smoothing. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 10(2), 1386–1401. <https://doi.org/10.1109/TCC.2020.2989631>
- Yang, J., Gong, P., Fu, R., Zhang, M., Chen, J., Liang, S., Xu, B., Shi, J., & Dickinson, R. (2013). The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change*, 3(10), 875–883. <https://doi.org/10.1038/nclimate1908>
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., Haeberli, W., Denzinger, F., Ahlström, A. P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L. N., Cáceres, B. E., Casassa, G., Cobos, G., Dávila, L. R., Delgado Granados, H., Demuth, M. N., ... Vincent, C. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>
- Zhao, F., Gong, W., Bianchini, S., & Yang, Z. (2024). Linking glacier retreat with climate change on the Tibetan Plateau through satellite remote sensing. *The Cryosphere*, 18(12), 5595–5612. <https://doi.org/10.5194/tc-18-5595-2024>
- Zhou, H., Wang, X., & Zhu, R. (2022). Feature selection based on mutual information with correlation coefficient. *Applied Intelligence*, 52(5), 5457–5474. <https://doi.org/10.1007/s10489-021-02524-x>
- Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>