

## Analisis Geospasial Berbasis Cloud untuk Pemetaan Risiko Erosi Lahan di Kabupaten Ponorogo

Adi Fajaryanto Cobantoro<sup>1✉</sup>, Ismail Abdurrozzaq Zulkarnain<sup>2</sup>, Arin Yuli Astuti<sup>3</sup>, Sugianti<sup>4</sup>  
<sup>1-4</sup>Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Indonesia

✉Corresponding Author: adifajaryanto@umpo.ac.id

### ABSTRAK

Kabupaten Ponorogo memiliki karakteristik topografi yang didominasi perbukitan dan pegunungan, sehingga rentan terhadap erosi lahan yang berdampak pada degradasi tanah, sedimentasi, dan peningkatan potensi bencana. Penelitian ini bertujuan memetakan distribusi spasial tingkat bahaya erosi serta menganalisis dinamika perubahannya di Kabupaten Ponorogo selama periode 2020–2023 menggunakan model Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) berbasis Google Earth Engine (GEE). Data yang digunakan meliputi CHIRPS untuk faktor erosivitas hujan (R), OpenLandMap untuk erodibilitas tanah (K), SRTM DEM untuk faktor panjang dan kemiringan lereng (LS), serta MODIS NDVI untuk faktor tutupan lahan (C), sedangkan faktor konservasi (P) diasumsikan bernilai 1. Hasil analisis menunjukkan bahwa wilayah tengah Kabupaten Ponorogo cenderung berada pada kategori bahaya erosi sangat rendah hingga sedang, sedangkan wilayah selatan, tenggara, dan timur yang memiliki lereng lebih curam secara konsisten berada pada kategori tinggi hingga sangat tinggi. Secara temporal, rata-rata kehilangan tanah tahunan meningkat dari 19,24 ton/ha/tahun pada 2020 menjadi 27,6 ton/ha/tahun pada 2021, lalu sedikit menurun menjadi 24,7 ton/ha/tahun pada 2022, sebelum melonjak tajam menjadi 77 ton/ha/tahun pada 2023. Lonjakan ini mengindikasikan adanya anomali erosi yang diduga kuat dipengaruhi oleh penurunan tutupan vegetasi akibat kondisi kering terkait El Niño 2023, sehingga faktor C menjadi lebih dominan dibanding variasi curah hujan. Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi RUSLE dan GEE efektif untuk mengidentifikasi pola spasio-temporal erosi serta mendukung penentuan prioritas wilayah konservasi lahan secara lebih cepat dan berbasis data.

**Kata kunci** : erosi, RUSLE, Google Earth Engine, Ponorogo

### A. Pendahuluan

Kabupaten Ponorogo secara geografis merupakan wilayah yang dikelilingi oleh perbukitan dan pegunungan, terutama di bagian timur dan selatan yang merupakan bagian dari rangkaian Pegunungan Wilis dan Pegunungan Selatan [1]. Kondisi topografi dengan kemiringan lereng yang curam menjadikan wilayah ini sangat rentan terhadap degradasi lahan, khususnya erosi tanah. Erosi bukan hanya berdampak pada hilangnya lapisan tanah pucuk yang subur, tetapi juga memicu masalah lingkungan yang lebih luas seperti sedimentasi pada bendungan/waduk di hilir dan peningkatan risiko bencana tanah longsor yang kerap melanda pemukiman warga. Oleh karena itu, pemantauan tingkat bahaya erosi secara rutin menjadi instrumen krusial dalam upaya mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang berbasis lingkungan.

Estimasi laju erosi secara konvensional melalui pengukuran petak ukur di lapangan memerlukan biaya yang besar, tenaga kerja yang banyak, dan waktu pengamatan yang sangat lama untuk mendapatkan cakupan wilayah seluas kabupaten. Kelemahan ini seringkali menyebabkan keterlambatan dalam pengambilan kebijakan konservasi lahan. Seiring dengan kemajuan teknologi informasi, pemanfaatan data penginderaan jauh (remote sensing) yang dikombinasikan dengan Sistem Informasi Geografis (SIG) menawarkan solusi

efisien [2]. Model Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) telah diakui secara luas sebagai metode yang efektif untuk memprediksi rata-rata kehilangan tanah tahunan dengan mengintegrasikan faktor curah hujan, karakteristik tanah, topografi, dan tutupan lahan [3], [4], [5].

Namun, pengolahan data spasial multi-temporal dalam skala besar sering kali terkendala oleh keterbatasan perangkat keras lokal dan kompleksitas pengolahan data mentah. Kehadiran Google Earth Engine (GEE) sebagai platform berbasis cloud computing memberikan terobosan baru [6], [7] melalui penyediaan akses ke dataset global seperti CHIRPS [8] untuk curah hujan dan MODIS [9] untuk dinamika vegetasi. GEE memungkinkan pemrosesan data big data penginderaan jauh secara instan tanpa perlu mengunduh data dalam volume besar, sehingga analisis perubahan spasio-temporal dapat dilakukan dengan presisi tinggi [10].

Penelitian ini bertujuan untuk memetakan distribusi spasial tingkat bahaya erosi di Kabupaten Ponorogo dan menganalisis tren perubahannya selama periode 2020 hingga 2023. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penggunaan data multi-temporal beresolusi tinggi di dalam platform GEE untuk menangkap anomali dinamika tutupan lahan (Faktor C) dan variabilitas curah hujan (Faktor R) secara tahunan. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai wilayah-wilayah kritis yang memerlukan prioritas penanganan konservasi, terutama dalam menghadapi fenomena iklim ekstrem yang memengaruhi stabilitas lahan.

## B. Metode

Penelitian ini dilakukan di Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur, dengan memanfaatkan platform cloud computing Google Earth Engine (GEE) untuk memproses data penginderaan jauh berskala besar secara efisien. Secara geografis, Kabupaten Ponorogo terletak antara  $111^{\circ}17' - 111^{\circ}52' BT$  dan  $7^{\circ}45' - 8^{\circ}10' LS$ . Wilayah ini memiliki karakteristik topografi yang bervariasi, mulai dari dataran rendah di bagian tengah hingga perbukitan terjal di bagian timur (lereng Gunung Wilis) dan jajaran pegunungan yang berbatasan langsung dengan Kabupaten Pacitan dan Wonogiri. Tabel 1 menunjukkan data yang digunakan dalam model RUSLE, data ini bersumber dari berbagai penyedia data satelit dan global yang tersedia di katalog GEE.

Tabel 1. Tabel Sumber Data

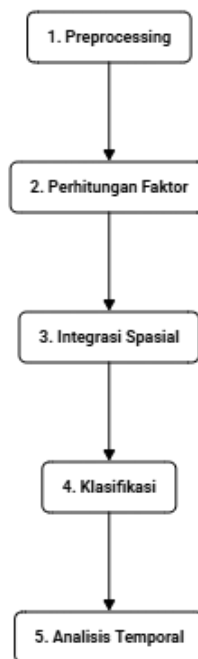
Faktor RUSLE	Dataset GEE	Deskripsi
R (Erosivitas Hujan)	CHIRPS Daily	Data curah hujan harian untuk menghitung indeks erosivitas tahunan.
K (Erodibilitas Tanah)	OpenLandMap	Data tekstur tanah (pasir, debu, lempung) dan karbon organik tanah.
LS (Topografi)	SRTM DEM 30m	Model elevasi digital untuk menghitung panjang dan kemiringan lereng.
C (Tutupan Lahan)	MODIS (MOD13Q1)	Indeks vegetasi (NDVI) 250m untuk memantau dinamika tutupan lahan.
P (Konservasi)	-	Diasumsikan bernilai 1 (tanpa tindakan konservasi) untuk analisis risiko potensial.

Model RUSLE merupakan model untuk menestimasi kehilangan tanah tahunan ( $A$ ) yang dihitung menggunakan integrasi lima faktor utama, yaitu:

$$A = R * K * LS * C * P [11]$$

Keterangan:

1.  $A$  : Rata-rata kehilangan tanah tahunan (ton/ha/tahun).
2.  $R$  : Faktor erosivitas hujan, dihitung berdasarkan intensitas dan durasi hujan tahunan menggunakan algoritma pengolahan data CHIRPS.
3.  $K$  : Faktor erodibilitas tanah, yang menunjukkan kerentanan jenis tanah terhadap pengikisan oleh air.
4.  $LS$  : Faktor panjang ( $SL$ ) dan kemiringan lereng ( $SS$ ) yang diekstraksi dari data SRTM menggunakan algoritma *flow accumulation*.
5.  $C$  : Faktor pengelolaan tanaman, yang diekstraksi secara dinamis dari nilai NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) untuk menangkap perubahan kerapatan vegetasi tiap tahun.



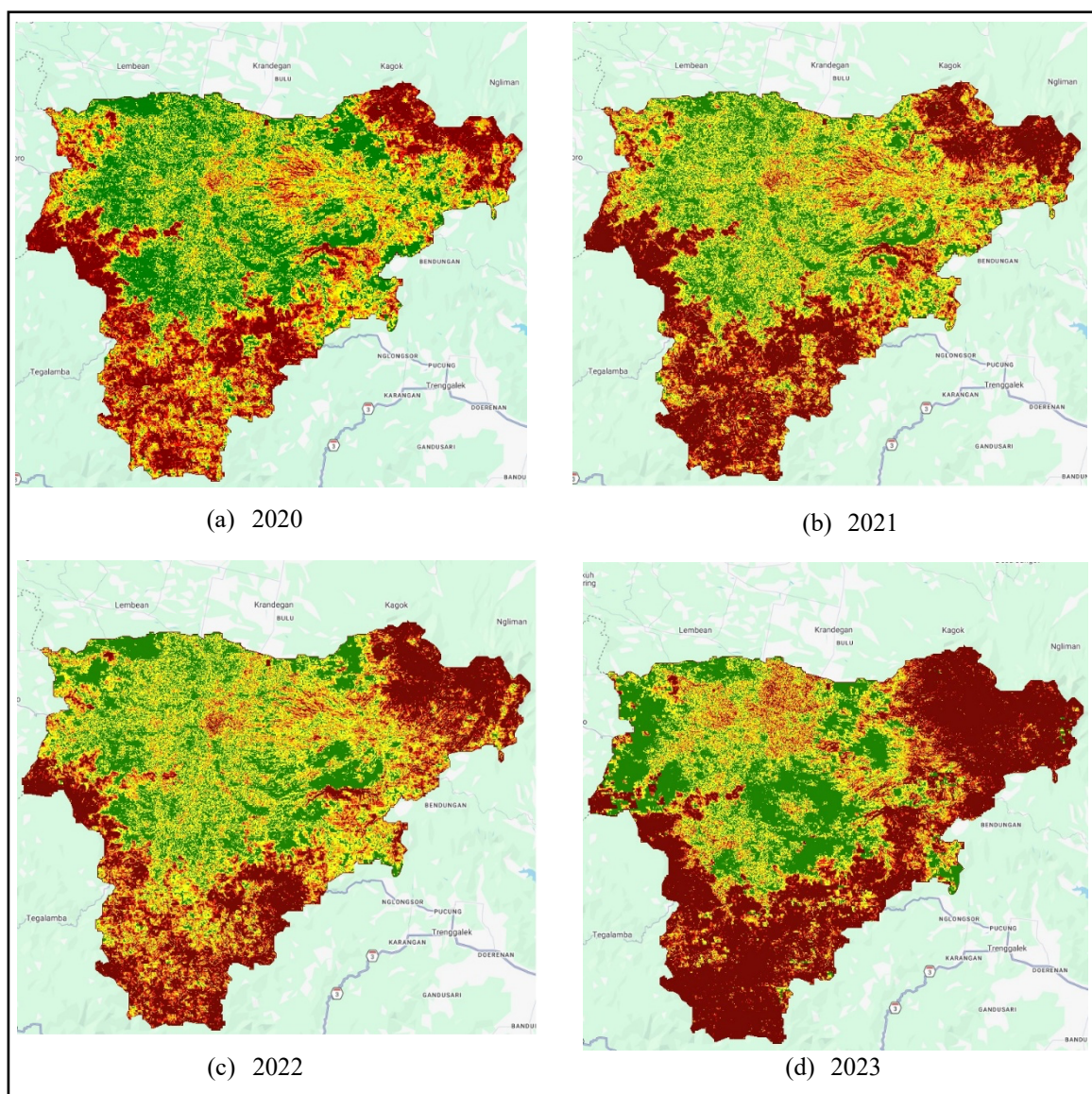
Gambar 1. Tahapan dalam penelitian

Tahapan komprehensif dalam penelitian ini, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, diimplementasikan melalui serangkaian proses *scripting* pada platform Google Earth Engine (GEE) yang diawali dengan tahap *preprocessing*, yakni penerapan *cloud masking* pada data MODIS untuk mengeliminasi tutupan awan serta agregasi nilai curah hujan tahunan dari dataset CHIRPS. Langkah berikutnya berfokus pada perhitungan faktor pembentuk erosi melalui pembuatan *raster layer* untuk masing-masing variabel ( $R$ ,  $K$ ,  $LS$ , dan  $C$ ), yang kemudian diintegrasikan secara spasial melalui perkalian matematis berbasis piksel (*pixel-based*) menggunakan fungsi `.multiply()` di dalam GEE. Dari hasil integrasi tersebut, nilai estimasi kehilangan tanah tahunan  $A$  selanjutnya diklasifikasikan ke dalam lima kategori Tingkat Bahaya Erosi (TBE) meliputi kelas Sangat Ringan, Ringan, Sedang, Berat, dan Sangat Berat. Kategori ini dibuat berdasarkan pada standar pedoman Peraturan Direktur Jenderal Rehabilitasi Hutan dan Lahan (RHL). Sebagai tahapan akhir, analisis temporal diaplikasikan dengan mengekstraksi nilai rata-rata spasial menggunakan fungsi *reducer* terhadap seluruh wilayah administratif Kabupaten Ponorogo selama periode observasi 2020 hingga 2023 guna mengevaluasi tren dinamika erosi secara komprehensif.

### C. Hasil dan Pembahasan

#### 1. Distribusi Spasial Tingkat Risiko Erosi (2020-2023)

Visualisasi hasil pemodelan RUSLE berbasis Google Earth Engine (GEE) pada Gambar 2 menunjukkan bahwa distribusi spasial tingkat bahaya erosi di Kabupaten Ponorogo selama periode 2020-2023 memiliki pola yang erat kaitannya dengan karakter fisiografi wilayah. Pada seluruh tahun pengamatan, area tengah kabupaten yang relatif lebih landai cenderung didominasi oleh kelas risiko sangat rendah hingga sedang, yang pada peta ditunjukkan oleh warna hijau dan kuning. Sebaliknya, area pinggiran, terutama bagian selatan, tenggara, dan timur, memperlihatkan dominasi kelas risiko tinggi hingga sangat tinggi, yang divisualisasikan oleh warna merah hingga merah tua. Pola ini mengindikasikan bahwa topografi berlereng curam masih menjadi pengontrol utama dalam pembentukan zona-zona rentan erosi.



**Gambar 2.** Distribusi spasial tingkat bahaya erosi di Kabupaten Ponorogo tahun 2020-2023

Pada tahun 2020, distribusi kelas bahaya erosi memperlihatkan kontras yang cukup tegas antara wilayah inti kabupaten dan wilayah perifer. Zona berisiko rendah masih tampak luas di bagian tengah hingga barat laut, sementara akumulasi kelas tinggi dan sangat tinggi terkonsentrasi pada kawasan perbukitan bagian selatan dan timur. Pola ini menunjukkan bahwa pada tahun awal pengamatan, kondisi wilayah secara umum masih relatif stabil, dengan area rentan tinggi belum mengalami perluasan signifikan ke pusat wilayah.

Pada tahun 2021, pola spasial masih mempertahankan struktur umum yang sama, namun tampak adanya peningkatan sebaran kelas kuning hingga merah pada beberapa zona transisi antara dataran tengah dan lereng di sisi timur serta selatan. Ini mengindikasikan bahwa meskipun wilayah inti masih didominasi kelas rendah, terdapat tekanan erosi yang mulai meningkat pada kawasan penyangga. Dengan kata lain, tahun 2021 dapat dibaca sebagai fase peningkatan risiko secara moderat, bukan perubahan morfologi spasial yang ekstrem.

Pada tahun 2022, peta menunjukkan kondisi yang relatif sebanding dengan tahun 2021, tetapi dengan kecenderungan redistribusi kelas risiko pada beberapa area lereng dan kaki bukit. Zona hijau di bagian tengah masih bertahan cukup dominan, sedangkan kelas merah tetap terkonsentrasi pada wilayah berbukit di bagian selatan dan timur. Secara visual, tahun 2022 memperlihatkan fluktuasi yang masih berada dalam kisaran pola normal tahunan, sehingga belum menunjukkan indikasi gangguan luar biasa pada sistem lahan secara menyeluruh.

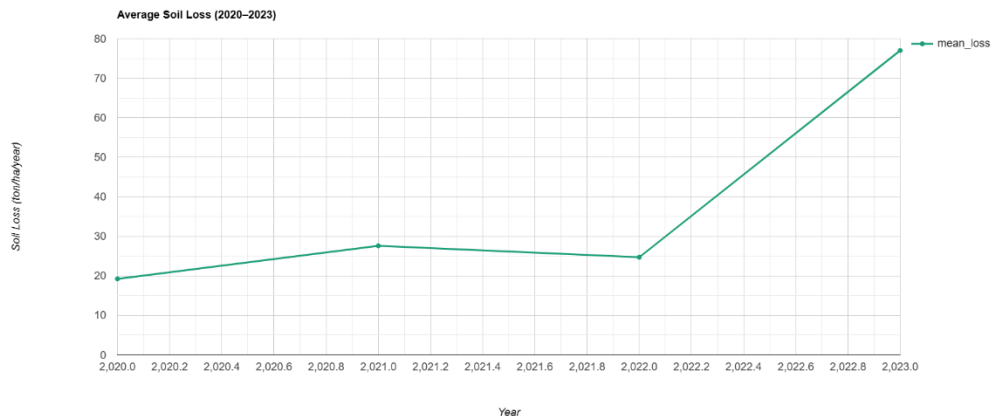
Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2(d), tahun 2023 menampilkan ekspansi paling luas pada kelas risiko tinggi hingga sangat tinggi dibandingkan tiga tahun sebelumnya. Perubahan paling menonjol tampak pada tahun 2023. Peta menunjukkan ekspansi luas kelas risiko sangat tinggi yang menyebar lebih intens di bagian timur, selatan, bahkan mulai menekan zona-zona transisional yang pada tahun-tahun sebelumnya masih berada pada kelas lebih rendah. Dibandingkan tiga tahun sebelumnya, warna merah tua terlihat lebih dominan dan lebih terkoneksi antarwilayah, menandakan peningkatan intensitas sekaligus luas area rentan. Secara interpretatif, perubahan ini menunjukkan bahwa pada tahun 2023 terdapat kombinasi faktor yang memperkuat proses erosi, baik berupa peningkatan erosivitas hujan, perubahan tutupan/pengelolaan lahan, maupun sensitivitas lereng yang terekspos lebih besar terhadap energi limpasan permukaan.

Secara keseluruhan, komparasi empat peta tahunan menegaskan bahwa kerentanan erosi di Kabupaten Ponorogo tidak bersifat statis. Walaupun pola dasarnya tetap mengikuti kendali topografi, intensitas dan luas sebaran kelas bahaya mengalami dinamika antarwaktu. Dalam konteks ini, tahun 2023 menjadi titik anomali yang sangat penting karena memperlihatkan lonjakan risiko yang jauh lebih nyata dibandingkan pola fluktuatif pada 2020-2022.

## **2. Tren Temporal Kehilangan Tanah Tahunan**

Pada Gambar 3 terlihat bahwa nilai rata-rata kehilangan tanah meningkat tajam pada tahun 2023, sehingga memperkuat indikasi adanya anomali erosi pada tahun tersebut. Temuan spasial tersebut diperkuat oleh grafik Average Soil Loss (2020-2023) yang menggambarkan perubahan rata-rata kehilangan tanah tahunan di Kabupaten Ponorogo. Berdasarkan grafik, nilai kehilangan tanah rata-rata pada tahun 2020 berada pada angka 19,24 ton/ha/tahun, kemudian meningkat pada tahun 2021 menjadi 27,6 ton/ha/tahun. Pada tahun 2022, nilai tersebut sedikit menurun ke 24,7 ton/ha/tahun. Pola ini menunjukkan

adanya dinamika temporal yang fluktuatif namun masih relatif stabil dalam tiga tahun pertama pengamatan.



**Gambar 3.** Tren rata-rata kehilangan tanah tahunan (ton/ha/tahun) periode 2020-2023

Fluktuasi pada periode 2020-2022 dapat diinterpretasikan sebagai respons normal sistem lahan terhadap variasi tahunan faktor-faktor pengendali erosi, terutama curah hujan, kondisi penutupan lahan, dan limpasan pada lereng. Kenaikan pada 2021 yang diikuti penurunan tipis pada 2022 mengindikasikan bahwa perubahan laju erosi belum mengarah pada tren peningkatan permanen. Dengan kata lain, meskipun terdapat dinamika, kapasitas bentang lahan pada periode tersebut masih menunjukkan pola yang terkendali.

Namun demikian, tahun 2023 menunjukkan diskontinuitas yang sangat jelas dari tren sebelumnya. Grafik memperlihatkan lonjakan tajam rata-rata kehilangan tanah hingga 77 ton/ha/tahun, atau lebih dari tiga kali lipat dibandingkan nilai tahun 2022. Kenaikan ini bukan sekadar fluktuasi biasa, melainkan anomali yang menandai perubahan sangat besar dalam respons sistem terhadap faktor pemicu erosi. Secara kuantitatif, lonjakan tersebut sejalan dengan hasil peta spasial tahun 2023 yang memperlihatkan perluasan kelas bahaya tinggi dan sangat tinggi.

Kesesuaian antara peta spasial dan grafik temporal memperkuat validitas interpretasi bahwa tahun 2023 merupakan periode dengan tingkat kerentanan erosi paling tinggi selama rentang studi. Hal ini penting karena menunjukkan bahwa perubahan yang diamati bukan hanya fenomena visual pada peta, tetapi juga tercermin secara nyata dalam statistik kehilangan tanah. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa integrasi analisis spasial dan temporal sangat efektif untuk mengidentifikasi tahun anomali, mengevaluasi tingkat degradasi lahan, dan menentukan prioritas wilayah konservasi tanah secara lebih presisi.

Lonjakan erosi pada tahun 2023 dapat dijelaskan sebagai anomali ketika faktor penutup lahan (C) lebih dominan daripada faktor curah hujan atau erosivitas hujan (R). Secara teoritis, Faktor C adalah parameter yang sangat sensitif dalam RUSLE, nilainya meningkat ketika vegetasi menurun, dan pada permukaan terbuka atau bare land nilainya mendekati 1, sehingga tanah menjadi jauh lebih rentan terhadap detasemen dan transport partikel. Bahkan, literatur menunjukkan bahwa variasi C dapat memperlebar hasil erosi hingga 2-3 orde magnitudo. Hal ini membuat penurunan hujan tidak otomatis menurunkan erosi jika pada saat yang sama perlindungan vegetasi runtuh. Hasil penelitian ini menunjukkan perbedaan dari studi Sydney [12] pasca kebakaran, yang menunjukkan lonjakan erosi terutama karena R-factor ekstrem dari storm events; pada Ponorogo, justru masuk akal bila lonjakan 2023 lebih dipicu oleh melemahnya C-factor, bukan semata-mata kenaikan hujan.

Interpretasi tersebut semakin kuat bila dikaitkan dengan fenomena El Niño 2023. BMKG menyatakan bahwa El Niño 2023 menyebabkan musim kemarau lebih panjang, kekeringan ekstrem di beberapa wilayah Indonesia, dan minimnya curah hujan akibat berkurangnya pembentukan awan hujan di Indonesia [13]. Studi berbasis NDVI di Parangloe, Gowa, juga menunjukkan bahwa selama fase El Niño 2023, luas area bervegetasi tinggi turun sekitar 43%, sementara area tanpa vegetasi meningkat tajam. Affandy dkk bahkan menegaskan bahwa kondisi ini meningkatkan kerentanan terhadap bencana lingkungan seperti erosi [14]. Di Bondowoso, studi lain menemukan peningkatan suhu permukaan dan mulai munculnya stres vegetasi pada 2023, meskipun belum dikategorikan sebagai kekeringan luar biasa [15]. Dibandingkan kedua studi itu, Ponorogo tampaknya merepresentasikan kasus yang lebih ekstrem, El Niño tidak hanya menekan kondisi vegetasi, tetapi juga cukup kuat untuk mengubah struktur proteksi permukaan tanah sehingga ketika hujan turun, meskipun tidak sebesar tahun-tahun basah, limpasan tetap menghasilkan erosi yang tinggi.

Sementara itu, konsistensi tingginya risiko erosi di Ngrayun dan Sooko lebih tepat dijelaskan oleh kontrol topografi permanen, khususnya faktor LS (slope length and steepness). Studi di Ordu, Turkiye, menunjukkan bahwa LS merupakan kontributor paling signifikan terhadap erosi, melampaui faktor-faktor lain, dan wilayah dengan lereng curam serta relief kompleks cenderung menjadi hotspot erosi [16]. Studi lain di kawasan pegunungan timur laut Turkiye juga menekankan bahwa interaksi antara vegetasi rendah dan lereng curam sangat menentukan besarnya kehilangan tanah [17]. Hasil Ponorogo sejalan kuat dengan dua studi tersebut, wilayah yang secara geomorfologis lebih curam akan tetap mempertahankan risiko tinggi lintas tahun, sehingga Ngrayun dan Sooko dapat dipahami sebagai hotspot struktural erosi. Perbedaannya, pada Ponorogo tahun 2023 hotspot topografis ini tampaknya mengalami amplifikasi tambahan akibat melemahnya vegetasi, sehingga faktor LS yang semula “konstan” menjadi jauh lebih destruktif ketika dipadukan dengan C-factor yang memburuk.

Dari sisi implikasi praktis, hasil ini menegaskan mengapa Google Earth Engine (GEE) dan penginderaan jauh sangat penting dalam studi erosi multitemporal. Jika analisis hanya mengandalkan curah hujan, maka anomali 2023 berisiko disalahartikan, karena paradoks utamanya justru terletak pada pelemahan vegetasi dan keterbukaan permukaan tanah. Studi Bekabad menekankan bahwa integrasi RUSLE-GEE memungkinkan pemantauan dinamika erosi secara berkelanjutan, cepat, dan berskala luas [18], sedangkan studi Sydney menunjukkan bahwa data satelit dan GEE mampu menangkap perubahan penutup lahan serta risiko erosi secara tepat waktu pada kondisi ekstrem [12]. Studi Turkiye juga menegaskan bahwa GEE memberi keuntungan dalam integrasi data topografi, NDVI, iklim, dan penggunaan lahan untuk mengungkap pola erosi yang tidak terlihat bila hanya memakai satu variabel [16]. Dibandingkan pendekatan konvensional berbasis hujan semata, temuan Ponorogo membuktikan bahwa GEE lebih unggul untuk membaca interaksi antara iklim, vegetasi, dan topografi secara simultan.

#### **D. Simpulan**

Kesimpulan dari penelitian ini, bahwa peningkatan signifikan tingkat erosi lahan di Kabupaten Ponorogo pada tahun 2023. Analisis menunjukkan bahwa faktor penutup lahan (indeks C) lebih dominan memicu laju erosi dibandingkan fluktuasi curah hujan. Berkurangnya kerapatan vegetasi terbukti lebih destruktif terhadap stabilitas tanah melampaui faktor iklim. Untuk mencegah eskalasi degradasi lahan, intervensi mitigasi proaktif mutlak diperlukan. Oleh karena itu, direkomendasikan implementasi program

reboisasi terpadu dan konservasi tanah, diprioritaskan pada wilayah dengan penurunan tutupan vegetasi drastis selama 2023, guna memulihkan kembali fungsi hidrologis dan ekologis lahan.

### Daftar Pustaka

- [1] I. Cahyanto Prayogi, A. Fajaryanto, and P. Astuti, "Perancangan Sistem Informasi Bagian Administrasi Mahasiswa dan Alumni (BAMA) Universitas Muhammadiyah Ponorogo Berbasis Web," 2020.
- [2] A. F. Cobantoro, M. A. Wibowo, and R. Sanjaya, "Harnessing Remote Sensing for Soil Erosion Prediction: A Bibliometric Review of RUSLE Applications," *Jurnal Sisfokom (Sistem Informasi dan Komputer)*, vol. 15, no. 1, pp. 33–39, Dec. 2025, doi: 10.32736/sisfokom.v15i1.2533.
- [3] F. Hateffard *et al.*, "CMIP5 climate projections and RUSLE-based soil erosion assessment in the central part of Iran," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-86618-z.
- [4] A. Zeghmar, E. Mokhtari, and N. Marouf, "A machine learning approach for RUSLE-based soil erosion modeling in Beni Haroun dam Watershed, Northeast Algeria," *Earth Sci. Inform.*, vol. 17, no. 4, pp. 2921–2936, Aug. 2024, doi: 10.1007/s12145-024-01305-7.
- [5] J. Rajbanshi and S. Bhattacharya, "Assessment of soil erosion, sediment yield and basin specific controlling factors using RUSLE-SDR and PLSR approach in Konar river basin, India," *J. Hydrol. (Amst.)*, vol. 587, p. 124935, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124935.
- [6] A. Srivastava and H. Sharma, "AI-Driven Environmental Monitoring Using Google Earth Engine," 2024, pp. 375–385. doi: 10.1007/978-3-031-68602-3\_19.
- [7] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sens. Environ.*, vol. 202, pp. 18–27, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [8] "CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations," Climate Hazards Center.
- [9] K. D. Hutchison, "Applications of MODIS satellite data and products for monitoring air quality in the state of Texas," *Atmos. Environ.*, vol. 37, no. 17, pp. 2403–2412, Jun. 2003, doi: 10.1016/S1352-2310(03)00128-6.
- [10] D. Fahmi Brillyansyah, F. Afnani, and A. Prasetyo, "Pemanfaatan Google Earth Engine dalam Mengidentifikasi Nilai Indeks Kerapatan Vegetasi (NDVI) Kabupaten Jember Menggunakan Citra Sentinel-2 Utilization of Google Earth Engine in Identifying Vegetation Density Index (NDVI) Values for Jember Regency Using Sentinel-2," in *The 2nd National Conference on Innovative Agriculture 2024*, Jember, Nov. 2024. doi: 10.25047/nacia.v2i1.252.
- [11] K. G. Renard, *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture, 1997.
- [12] X. Yang, M. Zhang, L. Oliveira, Q. R. Ollivier, S. Faulkner, and A. Roff, "Rapid assessment of hillslope erosion risk after the 2019–2020 wildfires and storm events in sydney drinking water catchment," *Remote Sens. (Basel)*, vol. 12, no. 22, pp. 1–20, Nov. 2020, doi: 10.3390/rs12223805.
- [13] Valdez Dwi, "Musim Hujan Akan Datang: Langkah Pengelolaan Bencana Terkait El Nino," <https://www.bmkg.go.id/berita/utama/musim-hujan-akan-datang-langkah->

- pengelolaan-bencana-terkait-el-nino*, Oct. 30, 2023.
- [14] A. Affandy Mahyuddin and S. Arif, “Spatial Analysis of Vegetation Condition in the El Nino Phase of 2023 in Parangloe District, Gowa Regency,” *International Journal of Engineering and Science Applications*, vol. 12, no. 1, May 2025, doi: 10.18280/ijesca.123456.
- [15] H. M. Suud and D. E. Kusbianto, “Exploring El Nino effects on agricultural area using Landsat images analysis: A case study in Bondowoso Regency, Indonesia,” *Sains Tanah*, vol. 21, no. 2, pp. 126–134, Dec. 2024, doi: 10.20961/stjssa.v21i2.85190.
- [16] E. D. Alebachew, W. Abiye, O. Dengiz, and İ. D. Turan, “Soil erosion estimation and risk assessment based on RUSLE in Google Earth Engine (GEE) in Turkiye,” *Ann. GIS*, vol. 31, no. 1, pp. 123–141, 2025, doi: 10.1080/19475683.2025.2452262.
- [17] O. Baskan, H. Cebel, S. Akgul, and G. Erpul, “Conditional simulation of USLE/RUSLE soil erodibility factor by geostatistics in a Mediterranean catchment, Turkey,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 60, no. 6, pp. 1179–1187, 2010, doi: 10.1007/s12665-009-0259-2.
- [18] O. Ibragimov, B. Inamov, and S. Alimakhmatova, “Assessing Soil Erosion Dynamics in the Bekabad district, Uzbekistan: A Remote Sensing Approach Integrating the RUSLE Model and Google Earth Engine,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Nov. 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202459001005.