

Penilaian Erosi Tanah dan Sedimen pada Ekosistem Rawa Pegunungan menggunakan Model InVEST-SDR (Studi Kasus DAS Cidanau)

Soil Erosion and Sediment Assessment at Mountainous Swamp Ecosystem using InVEST-SDR Model (Case Study Cidanau Watershed)

Sri Malahayati Yusuf^{1*}, Tri Handayani², Gilang Munggaran³, Kartika Triasary², Bagus Budiprakoso²

¹Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB, Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680 Jawa Barat

²Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Citarum Ciliwung, Kementerian Kehutanan, Jl. Rasamala, Curug Mekar, Kec. Bogor Barat, Kota Bogor 16116 Jawa Barat

³Pusat Penelitian Lingkungan Hidup, IPB, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680 Jawa Barat

*Corresponding email: srimalahayati@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

The Cidanau watershed is a unique hydrological region in Indonesia, distinguished by its mountainous swamp ecosystem. As a vital source of raw water for the surrounding communities, maintaining ecological sustainability is essential. This study aimed to evaluate soil erosion and sedimentation in the Cidanau watershed, focusing on the existing conditions and activity of forest and land rehabilitation. The rehabilitation program consists of vegetative and mechanical methods of soil and water conservation. The analysis was conducted using the InVEST-SDR model, integrated with a geographic information system, incorporating data on rainfall, soil characteristics, topography, land use, and conservation practices. Soil samples were collected using a stratified method from nine land units. The land use map for 2022 was improved using high-resolution imagery data and drone mapping. The results indicate that implementing vegetative and mechanical methods of soil and water conservation can decrease soil erosion and sedimentation. In detail, the area classified under very low erosion increased by 41%, while the areas with low, medium, high, and very high erosion decreased by 14.3, 24.6, 42.7, and 42.5%, respectively, compared to the existing scenario. Additionally, sediment levels declined, with the area under very low sedimentation increasing by 31.5% compared to the existing levels. These findings demonstrate that the implementation of soil and water conservation techniques effectively enhances watershed health and supports the long-term sustainability of water resources.

Keywords: geography information system, land and forest rehabilitation, soil and water conservation, spatial distribution, sustainability

ABSTRAK

DAS Cidanau merupakan salah satu DAS unik di Indonesia karena memiliki ekosistem rawa pegunungan. DAS Cidanau memiliki fungsi utama sebagai sumber air baku bagi masyarakat sekitar, sehingga perlu dipastikan bahwa kondisi DAS Cidanau tetap baik untuk menjaga keberlanjutan fungsi tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menilai erosi tanah dan sedimentasi di DAS Cidanau berdasarkan kondisi eksisting dan kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan berupa penerapan metode vegetatif dan mekanik dari konservasi tanah dan air. Data tanah diambil menggunakan metode stratified sampling dari sembilan unit lahan. Peta penggunaan lahan tahun 2022 diperdetail menggunakan citra resolusi tinggi dan hasil drone. Analisis dilakukan menggunakan model InVEST-SDR yang terintegrasi dengan sistem informasi geografi, dengan input data hujan, tanah, topografi, penggunaan lahan, dan tindakan konservasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa luas area untuk kelas erosi sangat rendah, rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi pada kondisi eksisting secara berurutan yaitu sebesar 7.345,4; 3.381,6; 4.367,98; 2.439,4; dan 966,17 ha. Penerapan metode vegetatif dan mekanik konservasi tanah dan air di DAS Cidanau mampu meningkatkan luas area dengan kelas erosi sangat rendah sebesar 41%, dan mampu menurunkan kelas erosi rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi masing-masing secara berurutan sebesar 14,3; 24,6; 42,7; dan 42,5% dibandingkan kondisi eksisting. Luas area untuk

kelas sedimen sangat rendah berdasarkan simulasi kondisi eksisting adalah sebesar 9.503,5 ha atau 51,4% terhadap total luas DAS. Nilai sedimen juga mengalami penurunan dengan diterapkannya konservasi tanah dan air, sehingga mampu meningkatkan cakupan luas area kelas sedimen sangat rendah sebesar 31,5% dibandingkan kondisi eksisting. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan metode vegetatif dan mekanik konservasi tanah dan air dapat memperbaiki kondisi DAS dan mendukung penggunaan yang berkelanjutan.

Kata kunci: sistem informasi geografi, rehabilitasi hutan dan lahan, konservasi tanah dan air, sebaran spasial, keberlanjutan

1. PENDAHULUAN

Danau sebagai bagian dari ekosistem sumberdaya air, memiliki fungsi ekonomi, ekologis, sejarah, sosial budaya, dan berperan penting dalam pengelolaan air (Miller, 2024; Zeleke et al., 2025). Fakta menunjukkan bahwa berbagai pemanfaatan sumberdaya perairan danau dan daerah tangkapan airnya seringkali mengakibatkan kerusakan ekosistem danau. Beberapa kerusakan yang sering ditemukan yaitu peningkatan sedimentasi, peningkatan intensitas banjir di musim hujan dan kekeringan di musim kemarau, penurunan kualitas air, penurunan keanekaragaman hayati, penurunan produktivitas perikanan dan penurunan potensi perekonomian (Marsudi, 2025; IERE, 2025; Tambunan & Sinaga, 2025; UNEP, 2025). Oleh karena itu, upaya penyelamatan danau perlu berfokus pada pemulihan kondisi badan air, daerah tangkapan, dan sempadan danau agar dapat digunakan secara berkelanjutan. Hal tersebut tertuang dalam Peraturan Presiden RI Nomor 60 Tahun 2021 tentang Penyelamatan Danau Prioritas Nasional (Sekretariat Kabinet RI, 2021).

DAS Cidanau merupakan salah satu DAS penting di Provinsi Banten karena di dalamnya terdapat ekosistem kaldera purba yang merupakan kawasan konservasi flora fauna endemis dan satu-satunya ekosistem rawa pegunungan yang masih tersisa di Pulau Jawa (Amaruzaman & Leimona, 2015; DLHK, 2017). Dikarenakan fungsinya yang penting, DAS Cidanau juga merupakan sumber air utama untuk masyarakat di sekitarnya termasuk industri di kota Cilegon (DLHK, 2017). Ketersediaan air tersebut dapat terganggu karena beberapa permasalahan di DAS Cidanau yaitu debit air yang tidak stabil, sedimentasi, perambahan, tumpang tindih kawasan, perubahan penggunaan lahan, dan kualitas air (DLHK, 2017; Sunaedi et al., 2019).

Pengelolaan DAS Cidanau telah dilakukan melalui program kemitraan hulu hilir dengan skema pembayaran jasa lingkungan untuk perbaikan pemanfaatan lahan dan pengelolaan sumberdaya hutan yang optimal (DLHK, 2017; Sunaedi et al., 2018). Skema tersebut melibatkan kelompok tani pemanfaat air baku (PT Krakatau Tirta Indonesia), Forum Komunikasi DAS Cidanau dan Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPDAS) Citarum

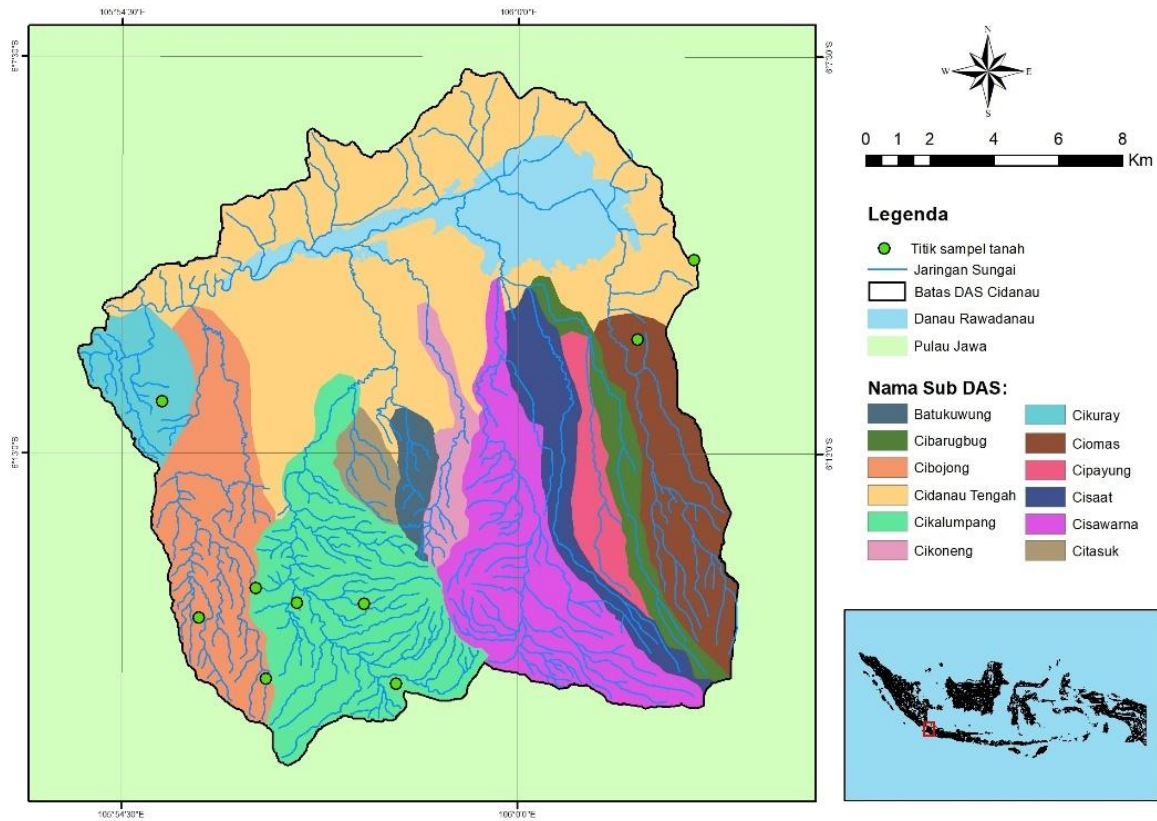
Ciliwung. Selain skema tersebut, BPDAS memiliki program tahunan yang dilakukan untuk memperbaiki kondisi DAS yaitu melalui kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan (RHL).

Kegiatan RHL di DAS Cidanau telah dilakukan sejak tahun 2018 dengan menerapkan tindakan konservasi tanah dan air (KTA) baik metode vegetatif maupun mekanik. Kegiatan tersebut perlu dievaluasi dalam rangka menilai efektivitas tindakan yang diterapkan. Proses evaluasi juga dapat membantu menyediakan data terkini kondisi DAS Cidanau. Salah satu model yang dapat digunakan untuk melakukan evaluasi kegiatan di suatu DAS adalah model InVEST. Model InVEST merupakan model yang umum digunakan untuk mengevaluasi jasa ekosistem. Model tersebut dikembangkan oleh peneliti dari Stanford University, University of Minnesota, the Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, the World Wildlife Fund, the Stockholm Resilience Centre dan the Royal Swedish Academy of Sciences (Natural Capital Project, 2023). Sejak dikembangkan pada tahun 2008, model InVEST banyak digunakan untuk mengidentifikasi dan menilai jasa ekosistem (Trisurat et al., 2016; Gao et al., 2017; Adedeji & Elegbede, 2018; Redhead et al., 2018; Sun et al., 2018; Gaglio et al., 2019; Lewis et al., 2020; Benra et al., 2021; Wei et al., 2021; Miner et al., 2022; Zhao et al., 2022; Garsia et al., 2023). Model InVEST-SDR (Sediment Delivery Ratio), sebagai salah satu modul dalam model InVEST, digunakan dalam penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penerapan tindakan KTA terhadap erosi dan sedimentasi karena merupakan salah satu model yang banyak digunakan secara luas untuk pemodelan erosi tanah dan sedimentasi (Zhou et al., 2019; Gashaw et al., 2021; Marques et al., 2021; Karunaratne et al., 2022; Abeysingha et al., 2023; Bhattacharya et al., 2024; Mukhopadhyay et al., 2025).

2. METODOLOGI

2.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di DAS Cidanau (Gambar 1) pada bulan Maret sampai Desember 2023. Secara geografis, DAS Cidanau terletak antara 105°49'00" - 106°04'00" BT dan 6°07'30" - 6°18'00" LS dengan luas sebesar 20.023 ha. Hulu DAS Cidanau adalah Cagar Alam Rawadana, merupakan ekosistem rawa pegunungan yang masih ada di Pulau Jawa. Analisis sampel tanah dilakukan di Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian IPB.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian DAS Cidanau

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian ini mencakup tahapan persiapan dan pelaksanaan. Tahapan persiapan meliputi identifikasi awal kondisi DAS dan data-data yang diperlukan dalam penelitian. Tahap pelaksanaan meliputi pengumpulan data primer dan sekunder, pengolahan dan analisis data, dan pembahasan. Data primer meliputi pengambilan sampel tanah, pengamatan kondisi tutupan lahan dan teknik konservasi tanah dan air yang diterapkan. Penjelasan detil terkait ini disajikan pada Sub bab parameterisasi model.

2.3. Parameterisasi Model InVEST-SDR

Model InVEST-SDR menghitung jumlah tanah tererosi dari suatu lanskap dan jumlah yang masuk ke saluran sungai (Sharp et al., 2020). Erosi dihitung pada setiap sel menggunakan persamaan RUSLE (Renard et al., 1997), kemudian rasio penghantaran sedimen (SDR) dihitung menggunakan persamaan yang diperkenalkan oleh Borselli et al. (2008). Jumlah sedimen total merupakan penjumlahan dari setiap nilai pada masing-masing piksel. Jumlah erosi rata-rata tahunan pada setiap piksel i yaitu:

$$A_i = R_i \cdot K_i \cdot LSi \cdot C_i \cdot P_i \quad (1)$$

dimana A_i = laju erosi rata-rata tahunan (metrik $\text{ton ha}^{-1} \text{ tahun}^{-1}$) R_i = faktor erosivitas hujan/aliran permukaan ($\text{MJ mm (ha jam tahun)}^{-1}$), K_i = faktor erodibilitas tanah ($\text{ton ha jam (MJ ha mm)}^{-1}$), LS_i = faktor panjang dan kemiringan lereng, C_i = faktor pengelolaan tutupan lahan, P_i = faktor praktek konservasi. Nilai erosivitas hujan bulanan dihitung menggunakan data curah hujan periode 10 tahun (2013-2022) dari tiga stasiun hujan yaitu stasiun Ciomas, Cinangka, dan Padarincang dengan persamaan Lenvain. Nilai R tersebut kemudian diinterpolasi secara spasial menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) (Gambar 2a). Metode IDW juga digunakan oleh Ekanayaka et al. (2025) dalam menyusun data erosivitas hujan untuk analisis erosi di Malwathu Oya River dengan luas 34.000 ha menggunakan model InVEST.

Data erodibilitas tanah (Gambar 2b) dihitung menggunakan persamaan Wischmeier dan Smith (1978). Nilai tekstur, kadar bahan organik, dan permeabilitas tanah diperoleh dari hasil analisis laboratorium, sedangkan kode struktur tanah diperoleh dari hasil pengamatan di lapangan. Sampel tanah yang digunakan adalah sampel tanah terganggu dan sampel tanah utuh masing-masing sebanyak 18 sampel. Sampel tanah diambil di lapangan menggunakan metode *stratified sampling*, yaitu berdasarkan peta unit lahan yang disusun menggunakan peta tanah, penggunaan lahan, dan kemiringan lereng. Pengambilan sampel tanah tersebar pada sembilan satuan unit lahan dari total 36 satuan unit lahan di DAS Cidanau. Sampel tanah diambil pada kedalaman 0-20 cm.

Data panjang dan kemiringan lereng (Gambar 2c) dihitung di dalam model InVEST -SDR dengan persamaan yang dikembangkan oleh Desmet dan Govers (1996), menggunakan data DEMNAS (*Digital Elevation Model Nasional*) resolusi 8 m. Data pengelolaan tanaman dan teknik konservasi baik hasil wawancara, pengamatan lapang, maupun data dari BPDAS Citarum Ciliwung (penanaman pohon, dam pengendali, dam penahan, dan *gully plug*) diinput ke dalam peta penggunaan lahan. Peta penggunaan lahan tahun 2022 diperoleh dari BPDAS Citarum Ciliwung (Gambar 2d), dengan mendetilkkan peta tersebut menggunakan citra resolusi 15 m dan hasil pemetaan menggunakan drone yang dilakukan pada tahun 2023.

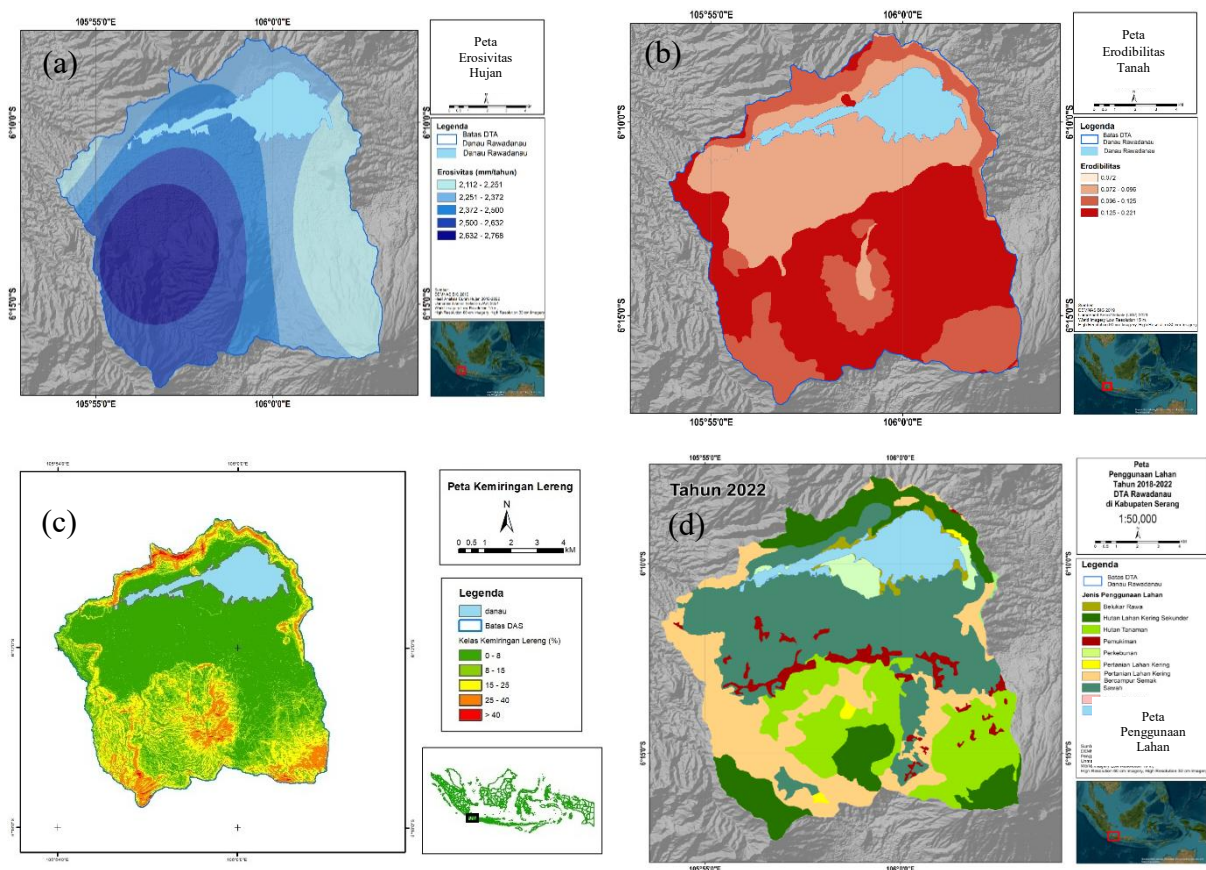
Jumlah sedimen dari setiap piksel dihitung dengan persamaan:

$$E_i = A_i \cdot \text{SDR}_i \quad (2)$$

dimana E_i = laju sedimen tahunan rata-rata ($\text{ton ha}^{-1} \text{ tahun}^{-1}$), A_i = erosi tanah rata-rata tahunan dari persamaan RUSLE ($\text{ton ha}^{-1} \text{ tahun}^{-1}$), dan SDR_i = rasio penghantaran sedimen. SDR dihitung menggunakan persamaan:

$$SDR_i = \frac{SDR_{max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_o - IC_i}{K}\right)} \quad (3)$$

dimana SDR_{max} = nilai SDR maksimum secara teori, IC (IC_o dan IC_i) dan K adalah parameter kalibrasi yang menentukan bentuk fungsi sigmoid dari hubungan SDR-IC. Nilai SDR_{max} sebesar 0,8, merupakan nilai *default* yang disarankan oleh Vigiak et al. (2012). Berdasarkan data-data tersebut, nilai erosi tanah dan sedimentasi DAS Cidanau diprediksi untuk kondisi eksisting (tahun 2018) dan kondisi penerapan teknik konservasi tanah dan air (tahun 2022).



Gambar 2. Peta erosivitas hujan (a), peta erodibilitas tanah (b), peta kemiringan lereng (c), dan peta penggunaan lahan tahun 2022 (d) DAS Cidanau

2.4. Validasi Hasil Model

Hasil model InVEST untuk DAS Cidanau divalidasi untuk memastikan bahwa input data yang digunakan telah merepresentasikan kondisi lapang. Proses validasi dilakukan dengan menentukan beberapa piksel nilai erosi hasil prediksi di DAS Cidanau yang nilainya meragukan, yaitu sebanyak 36 piksel. Piksel terpilih dijadikan acuan untuk pengamatan kondisi ril di lapangan meliputi penggunaan lahan eksisting, jenis tanah, kemiringan lereng, tindakan pengelolaan lahan, dan potensi erosi. Data-data tersebut digunakan untuk menjustifikasi apakah

nilai erosi prediksi sudah sesuai kondisi yang ada atau belum. Jika sudah sesuai, maka hasil pemodelan dapat langsung digunakan untuk analisis lanjutan. Sebaliknya, maka dilakukan proses *running* ulang melalui optimalisasi input nilai model berdasarkan hasil pengamatan lapang saat proses validasi. Klasifikasi kriteria hasil validasi model untuk parameter erosi dan sedimentasi mengacu kepada Moriasi et al. (2015) yaitu tidak memuaskan ($\leq 0,45$), memuaskan ($0,45-0,70$), baik ($0,70-0,80$), dan sangat baik ($\geq 0,80$).

2.5. Penentuan Sub DAS Prioritas

Suatu Sub DAS dijadikan sebagai Sub DAS prioritas apabila Sub DAS tersebut memiliki kelas bahaya erosi dan sedimen sangat tinggi dan tinggi dengan luas paling besar dibandingkan Sub DAS lain. Penentuan kelas prioritas mengacu pada Permenhut No. P32/Menhut-II/2009 untuk kelas erosi (Tabel 1), dan Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor P. 61/Menhut-II/2014 untuk sedimen (Tabel 2).

Tabel 1. Klasifikasi kelas bahaya erosi

Solum tanah (cm)	Kelas Bahaya Erosi				
	I	II	III	IV	V
	Erosi (ton/ha/tahun)				
	< 15	15-60	60-180	180-480	> 480
Dalam (>90)	SR	R	S	B	SB
Sedang (60-90)	R	S	B	SB	SB
Dangkal (30-60)	S	B	SB	SB	SB
Sangat dangkal (<30)	B	SB	SB	SB	SB

Keterangan: SR: sangat rendah, R: rendah, S: sedang, B: berat, SB: sangat berat

Tabel 2. Klasifikasi nilai sedimen

Besaran Sedimen (ton/ha)	Klasifikasi
< 5	Sangat rendah
$5 < MS \leq 10$	Rendah
$10 < MS \leq 15$	Sedang
$15 < MS \leq 20$	Tinggi
> 20	Sangat tinggi

Keterangan: MS: Muatan sedimen

2.6. Analisis Data

Data erosi tanah dan sedimentasi hasil model InVest dianalisis pada level Sub DAS dan DAS dikarenakan hasil model InVEST dalam format raster. Perbandingan nilai erosi tanah dan sedimentasi antara Sub DAS dilakukan secara deskriptif kuantitatif untuk menentukan Sub DAS Prioritas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

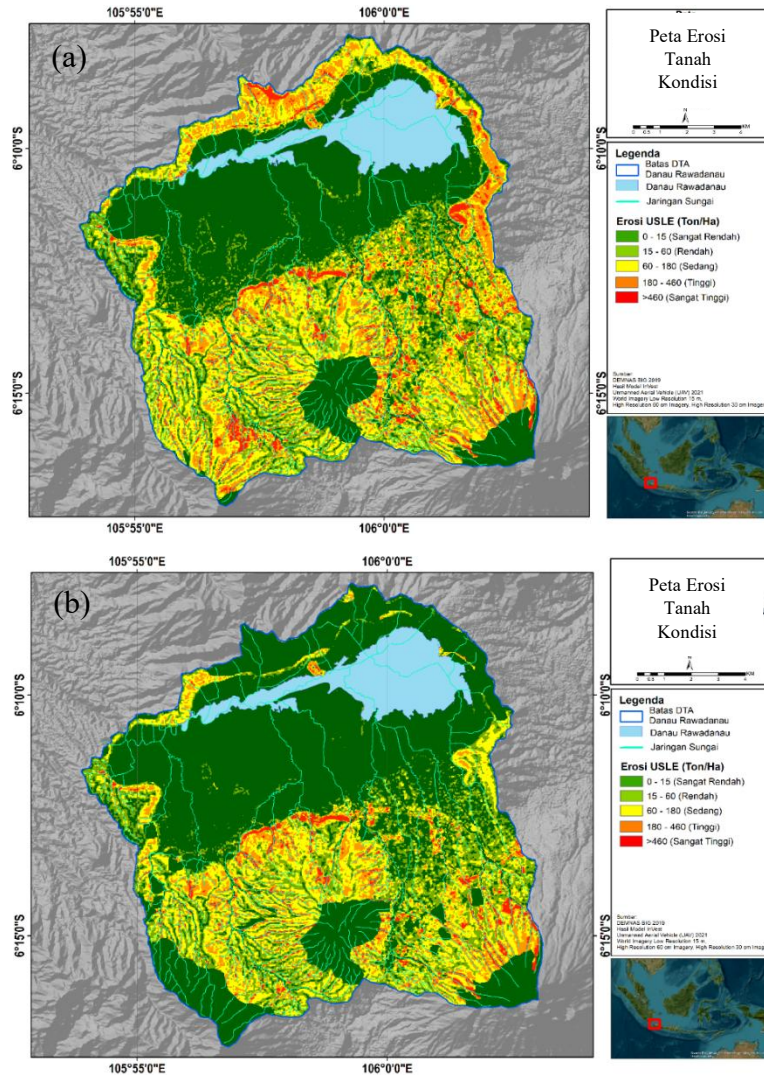
3.1. Validasi Model InVEST DAS Cidanau di Lapangan

Proses validasi hasil prediksi erosi DAS Cidanau dilakukan melalui proses verifikasi lapang terkait kemungkinan potensi erosi. Hal ini dilakukan karena terbatasnya data pengukuran nilai erosi tanah untuk proses kalibrasi model secara statistik. Sebanyak 36 titik yang diduga berpotensi mengalami kesalahan prediksi erosi diverifikasi di lapangan. Pendugaan tersebut dikarenakan dua hal yaitu (a) nilai prediksi erosi tanah sangat tinggi pada beberapa lokasi dengan karakteristik lahan yang baik, (b) untuk mengkonfirmasi nilai erosi tinggi pada lokasi dengan karakteristik kemiringan lereng curam. Berdasarkan hasil verifikasi, 64,52% hasil prediksi model InVEST DAS Cidanau sesuai dengan kondisi lapang. Berdasarkan hal tersebut, maka diasumsikan bahwa input model InVEST DAS Cidanau sudah dapat menggambarkan kondisi lapang. Hal ini diperkuat hasil penelitian Moriasi et al. (2015) yang menyatakan bahwa kategori nilai kalibrasi atau validasi pada rentang 0,45-0,7 sudah cukup memuaskan. Hasil penelitian di The Abbay (Upper Blue Nile) Basin menggunakan model InVEST juga menunjukkan bahwa model cukup baik dalam merepresentasikan kondisi lapangan (Gashwa et al., 2021)

3.2. Erosi Tanah

Sebaran spasial erosi tanah di DAS Cidanau tahun 2018 dan 2022 disajikan pada Gambar 3. Berdasarkan gambar tersebut, sebaran erosi tanah di DAS Cidanau dari satu lokasi ke lokasi lain sangat bervariasi mulai dari kelas bahaya erosi rendah hingga sangat tinggi. Penurunan erosi secara visual jelas terlihat pada hasil tahun 2022, tepatnya masuk ke dalam lokasi Sub DAS Cikalumpang yaitu di sebelah barat daya DAS Cidanau. Kegiatan RHL yang dilaksanakan sejak tahun 2018 berupa penerapan teknik konservasi tanah dan air (vegetatif dan mekanik) pada tahun tersebut telah memasuki tahun kelima. Ini menunjukkan bahwa kegiatan yang dilakukan telah memberikan pengaruh terhadap proses erosi yang terjadi. Penurunan ini salah satunya dikarenakan penanaman pohon yang dilakukan pada lokasi-lokasi yang terdegradasi, meski di Sub DAS Cikalumpang bukan luasan yang terbesar (Gambar 4). Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Karunaratne et al. (2022) dan Ekanayaka et al. (2025) yang menunjukkan bahwa penerapan praktek konservasi tanah mampu menurunkan nilai erosi tanah. Hal ini memperkuat teori terkait interaksi faktor tanaman dengan erosi tanah dan juga pernyataan Sun et al. (2018) yang menyatakan bahwa vegetasi berperan penting dalam proses erosi. Perkembangan pertumbuhan tanaman seperti kanopi yang semakin lebar, mampu

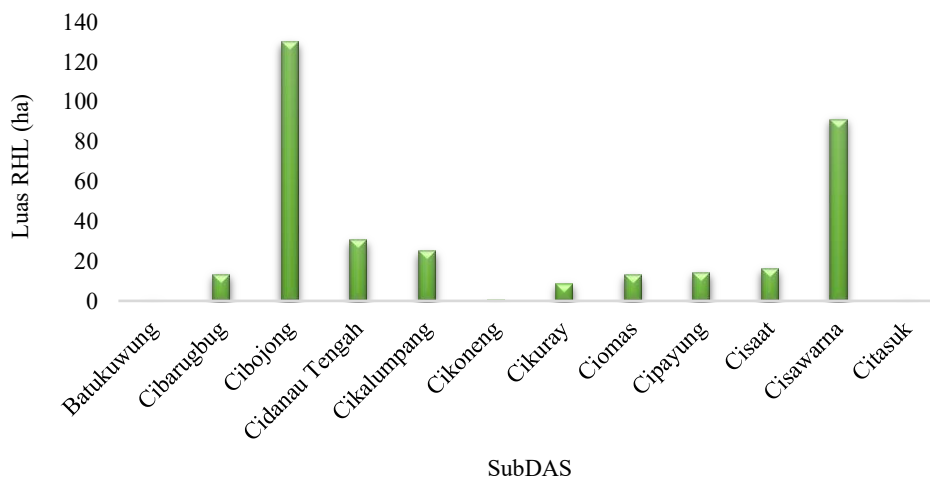
meredam kekuatan butir hujan sebagai penyebab terjadinya kerusakan agregat tanah. Sebagaimana dinyatakan oleh Wischmeier dan Smith (1978) bahwa luas kanopi dapat menahan kekuatan hujan dalam proses erosi.



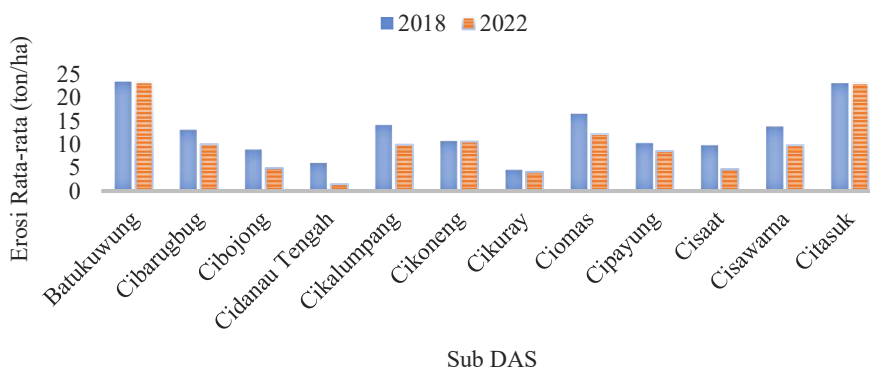
Gambar 1. Sebaran spasial erosi tanah hasil prediksi model InVEST di DAS Cidanau pada tahun 2018 (a) dan 2022 (b)

Pada level Sub DAS, nilai erosi rata-rata hasil prediksi model InVEST disajikan pada Gambar 5. Berdasarkan kategori kelas bahaya erosi, nilai erosi rata-rata di semua Sub DAS di DAS Cidanau masuk dalam kategori kelas bahaya erosi rendah dan sangat rendah. Pada dua titik tahun tersebut, terlihat bahwa nilai erosi rata-rata Sub DAS mengalami perubahan. Hal ini disebabkan adanya penerapan KTA pada beberapa lokasi di dalam DAS Cidanau (Gambar 4). Penurunan erosi tanah yang terjadi pada level Sub DAS di DAS Cidanau periode tahun 2018 – 2022 adalah berkisar 0,4 – 75,6%. Penurunan erosi rata-rata tertinggi terjadi di Sub DAS

Cidanau Tengah, meski luasan penerapan KTA di Sub DAS Cidanau Tengah juga bukan yang terbesar (Gambar 4). Hal ini mungkin saja terjadi karena besar kecilnya nilai erosi tidak hanya dipengaruhi oleh vegetasi, tetapi juga faktor hujan, topografi, kondisi tanah, dan tindakan konservasi (Yusuf et al., 2020; Gharibreza et al., 2021; Karunaratne et al., 2022; Ekanayaka et al., 2025). Faktor yang paling mempengaruhi tingginya penurunan erosi rata-rata di Sub DAS Cidanau Tengah adalah nilai erosivitas hujan dan topografi. Erosivitas hujan di Sub DAS Cidanau Tengah lebih rendah dibandingkan di Sub DAS Cibojong dan Cisawarna, sehingga pengaruhnya terhadap proses erosi kecil. Topografi di Sub DAS Cidanau Tengah lebih datar dibanding kedua Sub DAS tersebut, sehingga dapat juga mempengaruhi kecepatan aliran permukaan sebagai salah satu agen penyebab erosi tanah.



Gambar 2. Luas RHL pada setiap Sub DAS di DAS Cidanau



Gambar 5. Nilai erosi rata-rata prediksi model InVEST DAS Cidanau

Penurunan erosi rata-rata prediksi model InVEST di Sub DAS Cibojong dan Cisawarna lebih rendah dibandingkan Sub DAS Cidanau Tengah meski penerapan KTA di kedua Sub DAS tersebut adalah yang terluas. Teknik KTA yang diterapkan yaitu penanaman pohon, pembuatan

gully plug, dan dam penahan. Kurang efisiennya teknik KTA tersebut dikarenakan pengaruh faktor topografi. Topografi di kedua Sub DAS tersebut tergolong curam hingga sangat curam, yang memberikan pengaruh pada tingkat kerapatan pengaliran di kedua Sub DAS. Tingkat kerapatan pengaliran di Sub DAS Cibojong dan Cisawarna berurutan sebesar 2,42 dan 2,22 km/km² dibandingkan di Sub DAS Cidanau Tengah sebesar 0,94 km/km² (BPDAS Citarum Ciliwung, 2009). Semakin tinggi kerapatan aliran menunjukkan semakin banyak jumlah air larian dan hal ini berpengaruh terhadap proses terjadinya erosi.

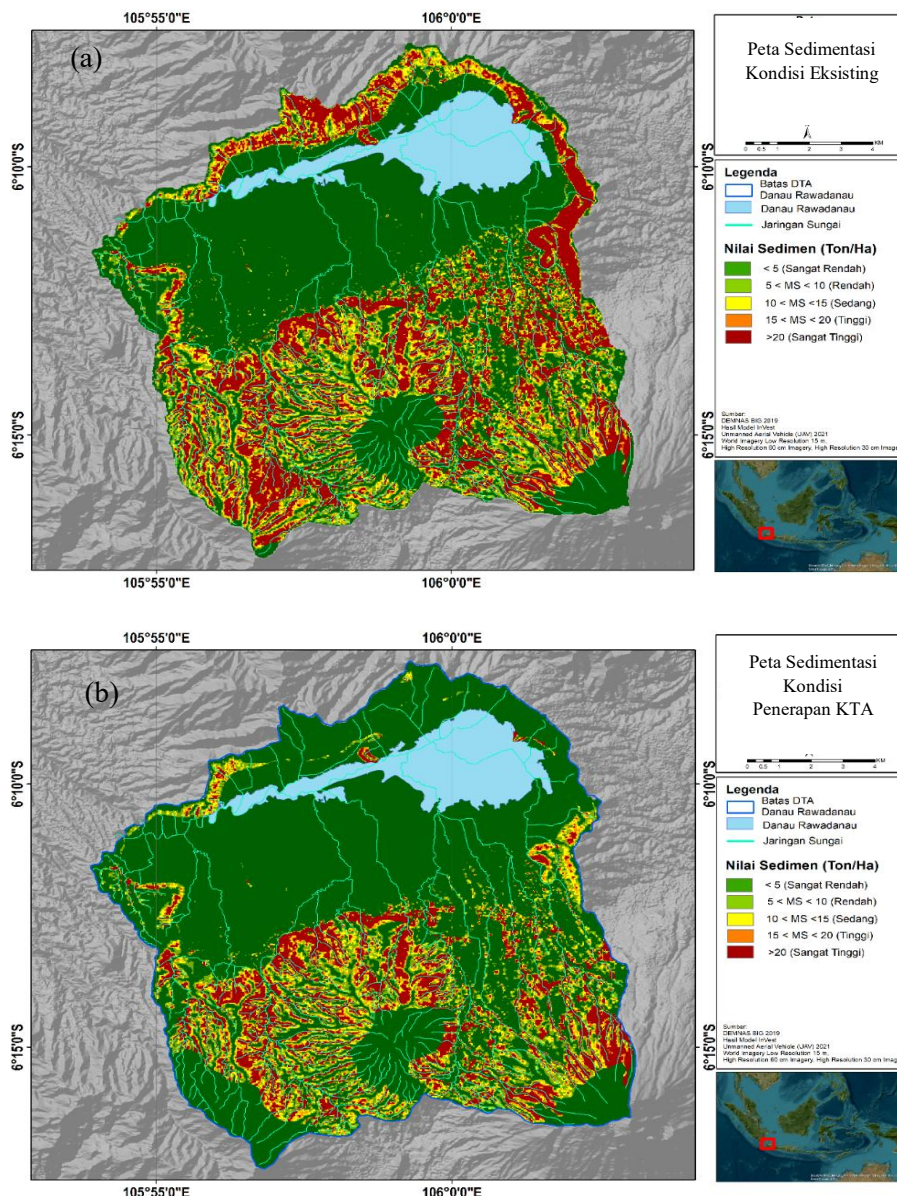
Penurunan erosi rata-rata pada level Sub DAS dikarenakan kegiatan KTA yang diterapkan pada level tapak, sehingga menyebabkan terjadinya perubahan kelas bahaya erosi pada masing-masing piksel yang berkontribusi pada perubahan luas kelas erosi pada level DAS. Data erosi tanah pada kondisi eksisting dan penerapan KTA disajikan pada Gambar 3, Gambar 5, dan Tabel 3. Kelas erosi sangat rendah (0-15 ton/ha) pada kondisi eksisting, mencakup area seluas 7.345,40 ha dari luas DAS Cidanau, sedangkan pada kondisi penerapan KTA mencakup luas sebesar 10.357,94 ha. Secara keseluruhan, adanya penerapan KTA mampu meningkatkan luas area dengan kelas bahaya erosi sangat rendah sebesar 41%, dan menurunkan luas area dengan kelas bahaya erosi rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi masing-masing secara berurutan sebesar 14,3; 24,6; 42,7; dan 42,5% dibandingkan kondisi tanpa KTA (Tabel 3). Penerapan KTA memberikan pengaruh pada perbaikan kondisi vegetasi dan juga tanah. Penggunaan berbagai jenis pohon pada penerapan KTA vegetatif di DAS Cidanau memberikan implikasi pada jenis dan luas kanopi berbeda sehingga hal ini mampu meredam kekuatan butir hujan sebelum jatuh ke permukaan tanah. Adanya akar-akar pohon mampu meningkatkan daya resap tanah sehingga aliran permukaan berkurang. Srivastava et al. (2017) dan Aghsaei et al. (2020) juga mengungkapkan bahwa adanya penerapan teknik konservasi vegetatif dapat memberikan pengaruh terhadap karakteristik permukaan tanah, albedo, kapasitas infiltrasi, kedalaman perakaran, dan indeks luas daun.

Tabel 3. Luas kelas bahaya erosi di DAS Cidanau

Nilai Erosi (Ton/ha)	Tingkat Bahaya Erosi	Tahun 2018	Tahun 2022
		Luas (ha)	
0-15	Sangat Rendah	7,345.40	10,357.94
15-60	Rendah	3,381.64	2,899.52
60-180	Sedang	4,367.98	3,293.09
180-460	Tinggi	2,439.37	1,396.68
> 460	Sangat Tinggi	966.17	555.49

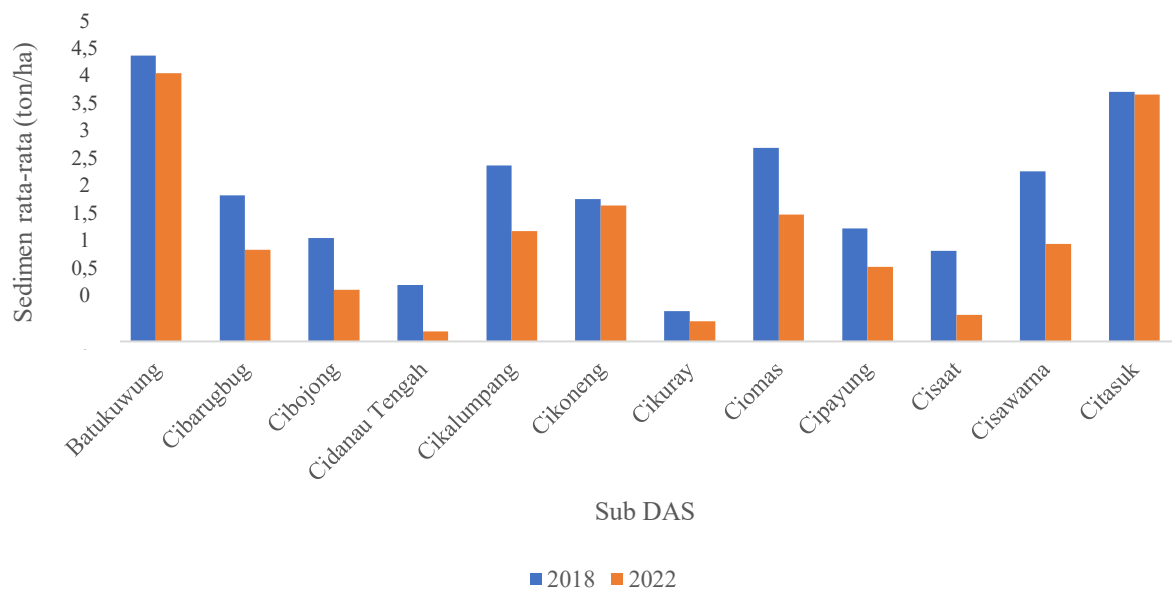
3.3. Sedimentasi

Sebaran spasial nilai sedimen prediksi di DAS Cidanau disajikan pada Gambar 6. Data sedimen prediksi per piksel berkisar antara 0 ton/ha hingga 3.465,03 ton/ha. Pada dua titik tahun, terlihat bahwa nilai sedimen pada unit analisis terkecil berkisar dari kelas sangat rendah hingga sangat tinggi. Pola sebaran sedimen mirip dengan pola sebaran erosi tanah. Sebaran erosi tanah dominan diprediksi terjadi di area-area dengan topografi curam (Gambar 3), begitu pula dengan sedimen. Melalui hal ini, dapat dikatakan bahwa tanah yang terangkut saat proses erosi, terdeposisi tidak jauh dari sumber asalnya. Berdasarkan Gambar 6 juga dapat diketahui bahwa sedimentasi banyak terjadi di dekat jaringan sungai.



Gambar 6. Sebaran spasial sedimen hasil prediksi model InVEST di DAS Cidanau pada tahun 2018 (a) dan 2022 (b)

Nilai sedimen pada unit terkecil digunakan untuk mengetahui sebaran nilai sedimen pada level Sub DAS. Adapun nilai sedimen rata-rata terendah tahun 2018 ditemukan pada Sub DAS Cikuray dan pada tahun 2022 di Sub DAS Cidanau Tengah. Nilai sedimen rata-rata tertinggi ditemukan di Sub DAS Batu Kuwung baik untuk tahun 2018 maupun 2022 (Gambar 7). Meski bukan luasan terbesar, adanya praktek KTA yang diterapkan di Sub DAS Cidanau Tengah tetap mampu menurunkan sedimen rata-rata di Sub DAS tersebut, dan merupakan penurunan tertinggi dibandingkan Sub DAS lainnya. Hal ini sejalan dengan penurunan tertinggi untuk parameter erosi tanah rata-rata yang juga terjadi di Sub DAS Cidanau Tengah. Menurunnya nilai erosi tanah karena penerapan KTA berarti jumlah tanah tererosi yang terbawa oleh aliran permukaan akan rendah sehingga menurunkan pula nilai sedimentasi.



Gambar 3. Nilai sedimen rata-rata hasil prediksi model InVEST di DAS Cidanau

Sejalan dengan hasil prediksi erosi, luas area pada level DAS untuk masing-masing kelas sedimen juga mengalami perubahan karena penerapan KTA (Tabel 4). Perubahan tertinggi terjadi pada kelas sedimentasi sangat tinggi, dimana terjadi pengurangan luas area sebesar 44,8% dibandingkan kondisi tanpa KTA. Pengurangan luas area kelas sedimentasi sangat tinggi ini terdistribusi ke kelas lainnya mulai dari sangat rendah hingga tinggi. Perubahan tersebut dikarenakan kegiatan KTA mampu melindungi permukaan tanah dari pukulan butir hujan dan juga meredam kekuatan aliran permukaan sehingga tanah yang tererosi menjadi berkurang. Dengan demikian, jumlah tanah yang terdeposisikan akan berkurang. Penelitian Ekanayaka et al. (2025) di Malwathu Oya Basin juga menunjukkan bahwa penerapan praktek konservasi

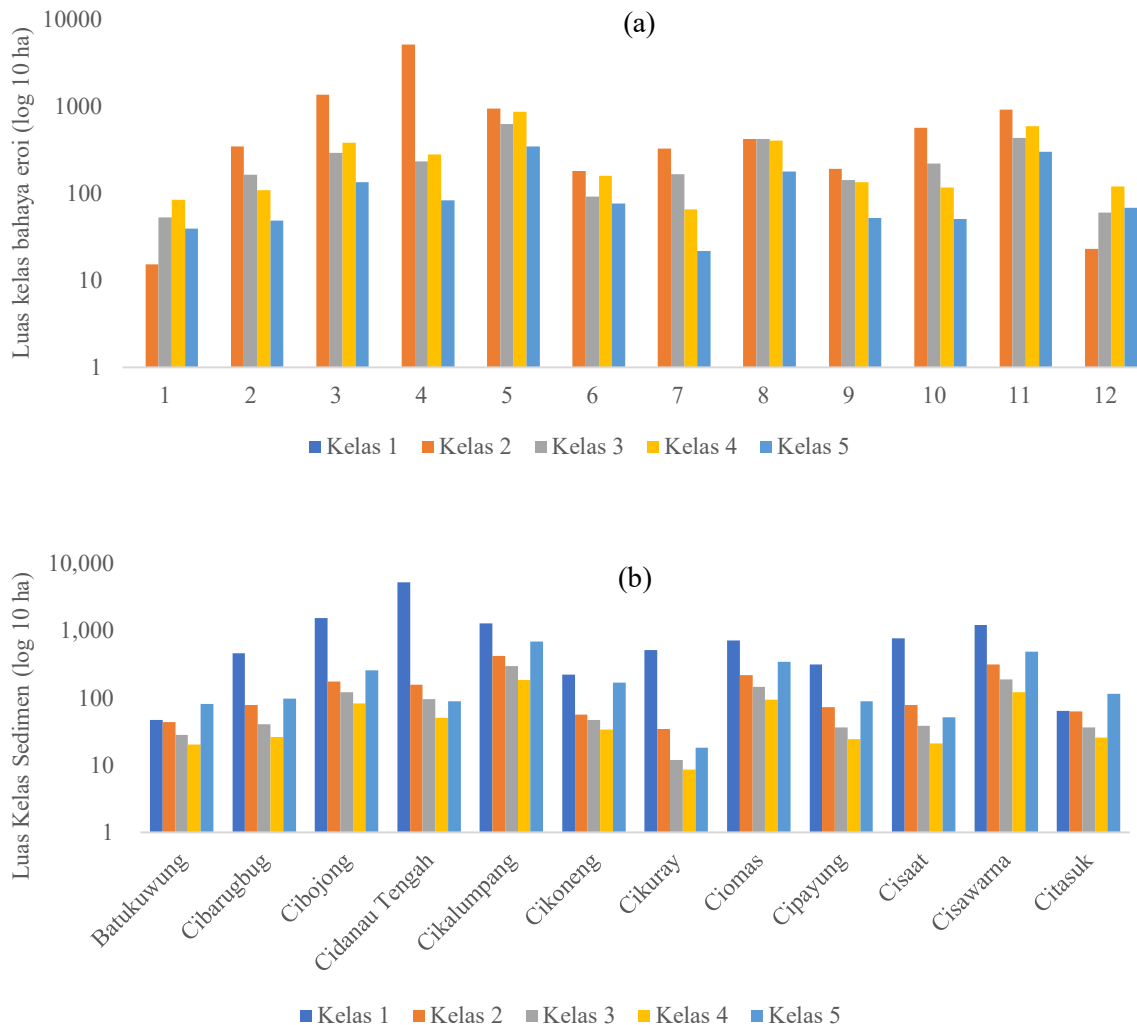
tanah pada area pertanian dengan elevasi tinggi mampu menurunkan nilai sedimen. Tentunya dipengaruhi pula oleh tingkat kekasaran permukaan tanah. Pada lereng yang panjang dan curam, jika di permukaan tanah banyak terdapat cekungan-cekungan atau topografi mikro yang bervariasi, maka tanah dapat terdeposisi di bagian tersebut. Beberapa hasil penelitian lain juga menyatakan bahwa cekungan di permukaan tanah dapat berfungsi sebagai penahan sedimen yang mampu mengurangi laju transportasi sedimen (Ta et al., 2025, Tong et al., 2025; Hamizak et al., 2025).

Tabel 4. Luas kelas sedimentasi hasil prediksi model InVEST di DAS Cidanau

Kategori Nilai Sedimen	Tahun 2018	Tahun 2022
	Luas (ha)	
Sangat Rendah	9.503,48	12.498,00
Rendah	2.042,59	1.715,18
Sedang	1.420,32	1.088,05
Tinggi	1.007,77	697,16
Sangat Tinggi	4.525,07	2.502,13

3.4. Sub DAS Prioritas

Sub DAS prioritas ditentukan berdasarkan kelas bahaya erosi (Tabel 1) dan sedimen (Tabel 2) sangat tinggi dan tinggi dengan luas paling besar dibandingkan Sub DAS lain. Sub DAS prioritas di DAS Cidanau ditentukan agar tersedianya informasi bagi stakeholder terkait mengenai pilihan Sub DAS yang dapat diutamakan untuk dikelola berdasarkan parameter erosi dan sedimen. Luas masing-masing kelas erosi dan sedimentasi disajikan dengan mentransformasi data luas menjadi nilai log 10 agar perbedaan luas antara tiap kelas dapat terlihat dengan jelas (Gambar 8).



Gambar 4. Luas kelas tingkat bahaya erosi (a) dan sedimentasi (b) hasil prediksi model InVEST di setiap Sub DAS di DAS Cidanau

Berdasarkan Gambar 8, terdapat tiga Sub DAS yang memiliki luas area dengan kelas bahaya erosi sangat tinggi dan tinggi lebih besar dibandingkan Sub DAS lainnya yaitu Sub DAS Cikalumpang, Sub DAS Cisawarna, dan Sub DAS Ciomas. Hal ini juga sejalan dengan luasnya area kelas sedimentasi sangat tinggi dan tinggi di ketiga Sub DAS tersebut dibandingkan Sub DAS lainnya. Oleh karena itu, ketiga Sub DAS ini bisa menjadi Sub DAS yang didahulukan untuk ditangani agar kondisi biofisik DAS menjadi lebih baik. Penentuan ketiga sub DAS tersebut sebagai sub DAS prioritas di DAS Cidanau berdasarkan parameter erosi dan sedimentasi sangat tinggi dan tinggi sesuai dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2012 mengenai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Dalam peraturan tersebut, parameter erosi dan sedimen menjadi bagian dalam menentukan kinerja pengelolaan DAS.

Nilai erosi dan sedimentasi yang tinggi menunjukkan bahwa ada bagian yang rusak/kritis di dalam DAS sehingga perlu untuk dikelola. Gashaw et al. (2021) juga menyatakan bahwa hasil prediksi erosi dan sedimentasi berdasarkan model InVEST-SDR dapat digunakan dalam penentuan sub DAS prioritas untuk perencanaan teknik konservasi tanah dan air.

4. KESIMPULAN

Upaya rehabilitasi hutan dan lahan melalui tindakan konservasi tanah dan air baik vegetatif dan mekanik di DAS Cidanau mampu menurunkan erosi dan sedimentasi. Tindakan KTA yang diterapkan dan disimulasikan menggunakan model InVEST menghasilkan perubahan luas area kelas bahaya erosi dan kelas sedimentasi. Perubahan terbesar terjadi pada kelas bahaya erosi tinggi dan sangat tinggi, yaitu terjadi penurunan luas area masing-masing secara berurutan sebesar 42,7 dan 42,5%; sedangkan luas area kelas bahaya erosi sangat rendah meningkat sebesar 41% dibandingkan kondisi tanpa KTA. Pada aspek sedimentasi, perubahan terbesar terjadi pada kelas sedimentasi sangat tinggi yaitu terjadi penurunan luas area sebesar 44,7% dibandingkan kondisi tanpa KTA, diikuti penurunan luas area kelas sedimentasi tinggi, rendah, dan sedang, masing-masing secara berurutan sebesar 30,8; 23,4, dan 16%. Penurunan luas area tersebut menyebabkan terjadinya peningkatan luas area kelas sedimentasi sangat rendah sebesar 31,5% dibandingkan kondisi tanpa KTA. Berdasarkan data kelas bahaya erosi dan sedimentasi, Sub DAS Cikalumpang, Sub DAS Cisawarna, dan Sub DAS Ciomas dapat dijadikan sebagai alternatif Sub DAS Prioritas dalam penerapan KTA pada periode berikutnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Citarum Ciliwung melalui Kegiatan Monitoring dan Evaluasi Rehabilitasi DTA Danau Rawadana Tahun 2023, sehingga kegiatan penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- Abeyasingha, N. S., Muthunayaka, C. H., Nirmanee, K. G. S., Amarasekara, M. G. T. S., & Ray, L. (2023). Application of InVEST SDR Model to Assess Soil Erosion and Sediment Export: A Case Study from Deduru Oya River Basin, Sri Lanka. *Journal of Agricultural Engineering*, 60(4), 419-431.
- Adedeji, O. H., & Elegbede, I. O. (2018). Mapping and Modeling Ecosystem Services in Petroleum-Producing Areas in Nigeria, The Political Ecology of Oil and Gas Activities in the Nigerian Aquatic Ecosystem. *Elsevier Inc.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809399-3.00012-4>.

- Aghsaei, H., Dinan, N. M., Moridi, A., Asadolahi, Z., Delavar, M., Fohrer, N., & Wagner, P. D. (2020). Effects of Dynamic Land Use/ Land Cover Change on Water Resources and Sediment Yield in the Anzali Wetland Catchment, Gilan, Iran. *Sci. Total. Environ*, 470, 567-577.
- Amaruzaman, S., & Leimona, B. (2015). Seleksi Imbal Jasa Lingkungan DAS Cidanau: Menumbuhkan Kesadaran Konservasi dan Meningkatkan Keterlibatan Petani dalam Skema Imbal Jasa Lingkungan. *Kiprah Agroforestri*, 11(1).
- Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung Citarum Ciliwung. (2009). *Data Karakteristik DAS Cidanau*. Direktorat Rehabilitasi Perairan Darat dan Mangrove: Balai Pengelolaan DAS Cirum Ciliwung.
- Benra, F., De Frutos, A., Gaglio, M., 'Alvarez-Garret'on, C., Felipe-Lucia, M., & Bonn, A. (2021). Mapping Water Ecosystem Services: Evaluating InVEST Model Predictions in Data Scarce Regions. *Environ. Modell. Softw*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104982>.
- Bhattacharya, R. K., Chatterjee, N. D., & Das, K. (2024). Modelling of Soil Erosion Susceptibility Incorporating Sediment Connectivity and Export at Landscape Scale using Integrated Machine Learning, InVEST-SDR and Fragstats. *Journal of Environmental Management*, 353, 120164. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120164>.
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to Sediment and Flow Connectivity in the Landscape: A GIS and Field Numerical Assessment. *Catena*, 75(3), 268-277.
- Desmet, P. J., & Govers, G. (1996). A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427-433.
- Dinas Lingkungan Hidup Kehutanan Provinsi Banten. (2017). Profil Ekosistem DAS Cidanau. Tersedia di <https://dlhk.bantenprov.go.id/berita/Profil-Ekosistem-DAS-Cidanau>.
- Ekanayaka, H. B. G. D. M. P., Abeysingha, N. S., Amarasekara, T., Ray, R. L., & Samarathunga, D. K. (2025). The Use of InVEST-SDR Model to Evaluate Soil Erosion and Sedimentation in the Closer Catchment of a Proposed Tropical Reservoir in Sri Lanka. *International Journal of Sediment Research*, 40(2), 253-268.
- Gaglio, M., Aschonitis, V., Pieretti, L., Santos, L., Gissi, E., Castaldelli, G., & Fano, E. A. (2019). Modelling Past, Present and Future Ecosystem Services Supply in a Protected Floodplain under Land Use and Climate Changes. *Ecological Modelling, Elsevier*, 403(C), 23–34. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2019.04.019.
- Gao, J., Li, F., Gao, H., Zhou, C., & Zhang, X. (2017). The Impact of Land-use Change on Water-related Ecosystem Services: A Study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *J. Clean. Prod*, 163, S148–S155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.049>.
- Garsia, A., Moinet, A., Vazquez, C., Creamer, R. E., & Moinet, G. Y. K. (2023). The Challenge of Selecting an Appropriate Soil Organic Carbon Simulation Model: A Comprehensive Global Review and Validation Assessment. *Global Change Biology*, 29, 5760–5774.
- Gashaw, T., Bantider, A., Zeleke, G., Alamirew, T., Jemberu, W., Worqlul, A. W., Dile, Y. T., Bewket, W., Meshesha, D. T., Adem, A. A., & Addisu, S. (2021). Evaluating InVEST Model for Estimating Soil Loss and Sediment Export in Data Scarce Regions of the

- Abbay (Upper Blue Nile) Basin: Implication for Land Managers. *Environmental Challenges*, 5(3), 1-13.
- Gharibreza, M., Samani A. B., Arabkhedri, M., Zaman, M., Porto, P., Kamali, K., & Sobh-Zahedi, S. (2021). Investigation of On-site Implications of Tea Plantations on Soil Erosion in Iran using ¹³⁷Cs Method and RUSLE. *Environmental Earth Sciences*, 80, 34. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09347-y>.
- Hamel, P., Chaplin-kramer, R., Sim, S., & Mueller, C. (2015). A New Approach to Modelling the Sediment Retention Service (InVEST 3.0): Case Study of the Cape Fear Catchment, North Carolina, USA. *Science of The Total Environment*, 524-525, 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.027>.
- Hamizak, S. N., Suif, Z., Ahmad, N., Jelani, J., Isa, N. A., & Farhani, N. N. (2025). Spatio-temporal Patterns of Soil Erosion and Sediment Yield in the UPNM Catchment. *Jurnal Kejuruteraan*, 37(3), 1505-1514. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37\(3\)-33](https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(3)-33).
- Indonesia Environment & Energy Center. (2015). *Policy brief: Payment for Environmental Services (PES) untuk pengelolaan DAS di Indonesia*. IEEC, Jakarta.
- Institute for Environmental Research and Education. (2025). *Life Cycle Assessment Applications in Aquatic Ecosystems*. IERE Publications.
- Karunaratne, A. S., Wimalasiri, E. M., Piyathilake, U., Gunatilake, S. K., Muttill, N., & Rathnayake, U. (2022). Modelling Potential Erosion and Sediment Delivery Risk in Plantations of Sri Lanka. *Soil Systems*, 6(4), 97, 1-16. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040097>.
- Lewis, C. J. E., Young, M. A., Ierodiasconou, D., Baldock, J. A., Hawke, B., Sanderman, J., Carnell, P. E., & Macreadie, P. I. (2020). Drivers and Modelling of Blue Carbon Stock Variability in Sediments of Southeastern Australia. *Biogeosciences*, 17(7), 2041-2059. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2041-2020>.
- Marques, S. M., Campos, F. S., David, J. & Cabral, P. (2021). Modelling Sediment Retention Services and Soil Erosion Changes in Portugal: A Spatial-temporal Approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 262, 1-14. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040262>.
- Marsudi, M. (2025). Dampak Pemanfaatan Sumberdaya Perairan terhadap Kualitas Ekosistem Danau di Indonesia. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, 19(2), 1263-1278.
- Miller, S. (2024). The Importance of Lake: Vital Ecosystems and Community Resources. *Journal of Aquaculture and Engineering and Fisheries Research*, 10(10), 110244. doi: 10.3153.JAEFR.10.10.97.
- Miner, K. R., Turetsky, M. R., Malina, E., Bartsch, A., Tamminen, J., McGuire, A. D., Fix, A., Sweeney, C., Elder, C. D., & Miller, C. E. (2022). Permafrost Carbon Emissions in A Changing Arctic. *Nat. Rev. Earth. Environ*, 3, 55–67. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00230-3>.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.

- Mukhopadhyay, A., Hati, J. P., Acharyya, R., & Pal, I. (2025). Global Trends in Using the InVEST Model Suite and Related Research: A Systematic Review. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 25(2), 389-405. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2024.06.002>.
- Natural Capital Project. (2023). Modeling Ecosystem Services and Natural Capital using InVEST Model. Hands on Training Manual. <https://www.naturalcapitalproject.org/invest/>.
- Redhead, J. W., May, L., Oliver, T. H., Hamel, P., Sharp, R., & Bullock, J. M. (2018). National Scale Evaluation of the InVEST Nutrient Retention Model in the United Kingdom. *Sci. Total Environ*, 610–611, 666–677. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.092>.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesie, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Government Printing Office, Washington, DC. p. 408.
- Sekretariat Kabinet RI. (2021). Peraturan Presiden RI Nomor 60 Tahun 2021 tentang Penyelamatan Danau Prioritas Nasional. Jakarta.
- Sekretariat Kabinet RI. (2014). Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.61/Menhut-II/2014 tentang Monitoring dan Evaluasi DAS. Jakarta.
- Sekretariat Kabinet RI. (2009). Permenhut No.P32/Menhut-II/2009 tentang Tata Cara Penyusunan Rencana Teknik Rehabilitasi Hutan dan Lahan Daerah Aliran Sungai. Jakarta.
- Sharp, R., Chaplin-kramer, R., Wood, S., Guerry, A., Tallis, H., Ricketts, T., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., et al. (2020). *InVEST User's Guide, Version 3*. Ed, The Natural Capital Project. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and Worl Wildlife Fund.
- Srivastava, V., Sarkar, A., Singh, S., Singh, P., de Araujo, A. S. F., & Singh, R. P. (2017). Agroecological Responses of Heavy Metal Pollution with Special Emphasis on Soil Health and Plant Performance. *Frontiers in Environmental Science*, 5(64). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00064>.
- Sun, X., Lu, Z., Li, F., & Crittenden, J. C. (2018). Analyzing Spatio-temporal Changes and Trade-offs to Support the Supply of Multiple Ecosystem Services in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 94(1), 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.049>.
- Sun, D., Zhang, W., Lin, Y., Shen, W., Zhou, L., Rao, X., Cai, X., He, D., et al. (2018). Soil Erosion and Water Retention Varies with Plantation Type and Age. *Forest Ecology and Management*, 422, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.048>.
- Sunaedi, N., Hadi, S. P., & A. Bambang. (2018). Essential Water Supply Resources through Payment for Environment Services Program in the Cidanau Watershed, Banten Province, Indonesia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 145(1), 1-7. doi: 10.1088/1755-1315/145/1/012133.
- Sunaedi, N., Hadi, S. P., & A. Bambang, N. (2019). Community-Based Environmental Management Through the Payments for Environmental Services Program in Cidanau Watershed, Banten Province, Indonesia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 338 (1), 1-12. doi: 10.1088/1755-1315/338/1/012002.

- Tambunan, H., & Sinaga, R. I. (2025). Sustainable Tourism and Ecosystem Management of Lake Toba. *Talanta Conference Series: Local Wisdom, Social, Arts (LWSA)*, 8(1), 45-46.
- Ta, N., Wang, C., Zhao, S., & Zhang, Q. (2025). Quantifying Soil Erosion Processes Based on Micro-DEM. *Water*, 17(17), 2557. <https://doi.org/10.3390/w17172557>.
- Tong, S., Li, G., Li, X., Li, J., Yue, D., Jiang, C., Li, Y., Zhu, H., Liu, Y., Chen, W., & Hu, X. (2025). Effects of Microtopography on Sediments Eroded from Bare Slopes of Zokor Mounds in the Yellow River Source Area, Western China. *Journal of Mountain Science*, 22, 3721-3743.
- Trisurat, Y., Eawpanich, P., & Kallila, R. (2016). Integrating Land Use and Climate Change Scenarios and Models into Assessment of Forested Watershed Services in Southern Thailand. *Environ. Res*, 147, 611-620. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02019>.
- United Nations Environment Programme. (2025). *Annual Report 2025: Integrated Lake Basin Management for Sustainable Development*. Nairobi: UNEP.
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L. T. H., McInnes, J., & Roberts, A. M. (2012). Comparison of Conceptual Landscape Metrics to Define Hillslope-scale Sediment Delivery Ratio. *Geomorphology*, 138(1), 74-88.
- Wei, P., Chen, S., Wu, M., Deng, Y., Xu, H., Jia, Y., & Liu, F. (2021). Using the InVEST Model to Assess the Impacts of Climate and Land Use Changes on Water Yield in the Upstream Regions of the Shule River Basin. *Water, Basel*, 13(9), 1-20. <https://doi.org/10.3390/w13091250>.
- Yusuf, S. M., Murtolaksono, K., & Laraswati, D. M. (2020). Pemetaan Sebaran Erosi Tanah Prediksi melalui Integrasi Model USLE ke dalam Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 10(4), 594-606. <http://dx.doi.org/10.29244/jpsl.10.4.595-606>.
- Zeleke, T. B., Soeprobawati, T. R., Adissu, S., & Warsito, B. (2025). Analysis the Effect of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Invasion on Water Quality and Trophic State of Lake Tana. *Chemistry and Ecology*, 41(3), 297-313. Doi: 10.1080/02757540.2024.2432886.
- Zhao, L., Yu, W., Meng, P., Zhang, J., & Zhang, J. (2022). InVEST Model Analysis of the Impacts of Land Use Change on Landscape Pattern and Habitat Quality in the Xiaolangdi Reservoir Area of the Yellow River basin, China. *Land. Degrad. Dev*, 33, 2870–2884. <https://doi.org/10.1002/ldr.4361>.
- Zhou, M., Deng, J., Lin, Y., Belete, M., Wang, K., Comber, A., Huang, L., & Gan, M. (2019). Identifying the Effect of Land Use Change on Sediment Export: Integrating Sediment Source and Sediment Delivery in the Qiantang River Basin, China. *Sci. Total Environ*, 686, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.336>.