

ANALISIS SPASIAL TEMPORAL NERACA AIR DAS KAPUAS, KALIMANTAN BARAT MENGGUNAKAN *GOOGLE EARTH ENGINE* DAN DATA *TERRACLIMATE*

Mohamad Rifai

Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PU, Jakarta, Indonesia

mohamad.rifai@pu.go.id

Pemasukan: 27 Agustus 2025

Perbaikan: 12 Desember 2025

Diterima: 27 Desember 2025

Intisari

Daerah Aliran Sungai (DAS) Kapuas merupakan sistem sungai terpanjang di Kalimantan. DAS ini memainkan peran krusial dalam tata kelola sumber daya air, keberlanjutan ekosistem hutan hujan tropis, serta ketahanan pangan regional. Menghadapi tekanan perubahan iklim, pemahaman mendalam terhadap dinamika neraca air menjadi kunci dalam perencanaan pengelolaan sumber daya air. Penelitian ini menyajikan analisis spasial-temporal neraca air di DAS Kapuas selama periode 2014 - 2024 dengan memanfaatkan data satelit *TerraClimate* dan platform komputasi awan *Google Earth Engine* (GEE). Variabel utama seperti curah hujan, evapotranspirasi, dan limpasan diintegrasikan untuk menghitung neraca air pada skala bulanan. Hasil menunjukkan pola musiman yang kuat: curah hujan rata-rata berkisar 150–400 mm/bulan, mencapai puncak antara Desember hingga Februari, sementara evapotranspirasi meningkat pada akhir musim kemarau (Agustus–Oktober). Limpasan menunjukkan korelasi tinggi dengan curah hujan, terutama di wilayah hulu dengan topografi curam. Secara umum, DAS Kapuas berada dalam kondisi surplus air, namun mengalami penurunan signifikan selama periode El Niño (2015, 2019, dan 2023), mengindikasikan kerentanan terhadap anomali iklim. Analisis spasial mengungkap distribusi heterogen: wilayah hulu dan tengah menunjukkan surplus tinggi (>100 mm/bulan), sedangkan wilayah hilir dan gambut terdegradasi mencatat surplus rendah atau defisit ringan. Integrasi data *TerraClimate* dan GEE efektif untuk pemantauan neraca air berskala besar secara efisien dan dapat direplikasi, menawarkan dasar kuat bagi kebijakan pengelolaan sumber daya air.

Kata kunci : DAS Kapuas, neraca air, TerraClimate, google earth engine, remote sensing.

Latar Belakang

Dasar Aliran Sungai (DAS) Kapuas yang membentang lebih dari 101.100 km² menciptakan ekosistem yang kompleks dan sangat berharga baik dari segi ekologis maupun sosio-ekonomi. Sungai Kapuas, yang merupakan sungai terpanjang di Indonesia dengan panjang 1.143 km, memainkan peran sentral sebagai pusat hidrologi Pulau Kalimantan. Ekosistem ini, yang terhubung dengan hutan hujan

primer di hulu, dataran aluvial di tengah, serta area gambut dan pesisir di hilir, menyimpan beragam sumber daya alam yang penting (BPS 2024).

Secara ekologis, DAS Kapuas berperan penting dalam menjaga stabilitas ekosistem sungai serta sebagai sumber air utama di Provinsi Kalimantan Barat, berfungsi sebagai water tower yang menopang keberagaman hayati unik kawasan tersebut. (Herawati, Suripin, dan Suharyanto 2015). Degradasi habitat, khususnya akibat dari deforestasi dan konversi lahan untuk perkebunan kelapa sawit, mengancam keseimbangan hidrologis dan mengakibatkan masalah seperti peningkatan risiko kebakaran hutan selama periode El Niño (Fibriantika dkk. 2021). Oleh karena itu, penting untuk melakukan pemantauan yang sistematis terhadap kondisi hidrologis untuk mendeteksi perubahan dini dan mengimplementasikan intervensi berbasis data yang efektif.

Perubahan iklim global kini mengganggu pola curah hujan di DAS Kapuas, memperburuk kondisi hidrologis dan meningkatkan frekuensi kejadian ekstrem seperti banjir dan kekeringan. Data dari *TerraClimate* yang menyediakan estimasi harian mengenai curah hujan, evapotranspirasi, dan limpasan menjadi aspek penting dalam analisis neraca air di wilayah ini, yang berfungsi sebagai prediktor kesehatan hidrologis (Abatzoglou dkk. 2018). Pemantauan neraca air, yang melibatkan selisih antara masukan (curah hujan) dan keluaran (evapotranspirasi dan limpasan), memberikan indikator kuantitatif mengenai surplus atau defisit air yang berhubungan langsung dengan produktivitas ekosistem dan potensi risiko bencana (Fibriantika dkk. 2021).

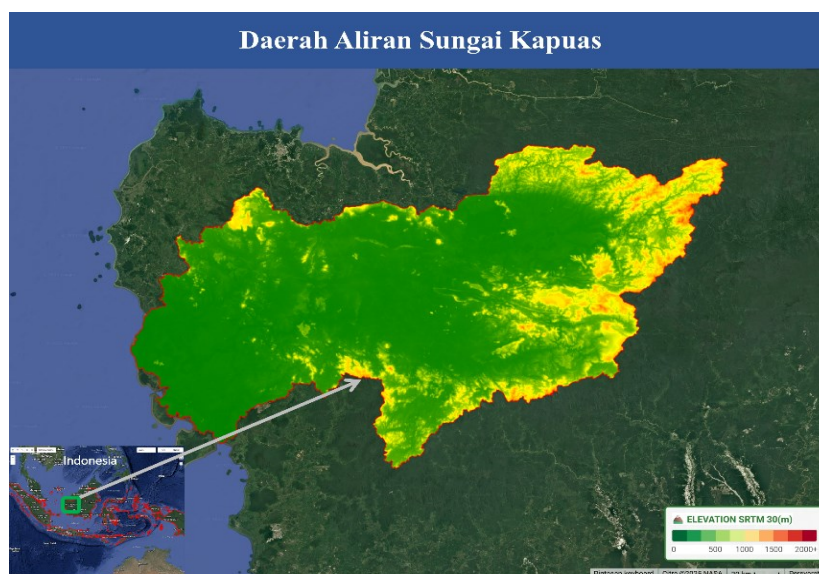
Kemajuan teknologi *remote sensing* dan komputasi awan telah membuka peluang baru untuk pemantauan hidrologi berskala besar (Rifai dan Harintaka 2025). *Google Earth Engine* (GEE) sebagai platform komputasi geospasial berbasis awan memungkinkan pengolahan data satelit dalam skala waktu panjang dan cakupan luas secara efisien (Gorelick dkk. 2017). Kombinasi GEE dengan dataset hidroklimatologi global seperti *TerraClimate*, yang menyediakan estimasi harian curah hujan, evapotranspirasi, dan limpasan dengan resolusi spasial ~4 km, menawarkan pendekatan yang andal untuk analisis neraca air di wilayah yang minim data (Abatzoglou dkk. 2018). Pendekatan ini sangat sesuai untuk mengevaluasi dinamika hidrologi DAS Kapuas secara komprehensif, terutama dalam merespons variabilitas iklim dan perubahan penggunaan lahan.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis dinamika spasial-temporal neraca air di DAS Kapuas selama periode 2014–2024; (2) mengidentifikasi pola musiman dan respons terhadap fenomena iklim ekstrem seperti El Niño; serta (3) mengevaluasi distribusi spasial surplus dan defisit air. Studi ini tidak hanya memberikan pemahaman ilmiah yang lebih dalam tentang dinamika hidrologi DAS Kapuas, tetapi juga menawarkan kerangka kerja yang dapat direplikasi untuk daerah aliran sungai lain di wilayah tropis.

Metodologi Studi

Lokasi dan Wilayah Studi

Wilayah studi mencakup seluruh Daerah Aliran Sungai Kapuas di Provinsi Kalimantan Barat, dengan batas administratif meliputi Kabupaten Kapuas Hulu, Sintang, Melawi, Sekadau, Sanggau, Kubu Raya, Landak dan Kota Pontianak (**Gambar 1**). Topografi wilayah ini bervariasi, dari pegunungan Schwaner di hulu, dataran perbukitan tengah, hingga dataran rendah dan rawa gambut di hilir. Wilayah ini beriklim tropis basah dengan dua musim utama: hujan (November–April) dan kemarau (Mei–Oktober), meskipun pola ini semakin tidak menentu akibat perubahan iklim.



Gambar 1 Lokasi Penelitian (Sumber: GEE, diproses oleh penulis, 2025)

Sumber Data

Data utama yang digunakan berasal dari *TerraClimate*, dataset global bulanan yang dikembangkan oleh tim IDAHO EPSCOR (**Tabel 1**). Dataset ini tersedia melalui GEE dan dihasilkan dari model keseimbangan energi dan air berbasis *Variable Infiltration Capacity* (VIC), yang dikalibrasi dengan data observasi iklim dan parameter tanah. Data *TerraClimate* terbukti akurat dalam merepresentasikan variabel hidro-klimatologi di skala regional, terutama di wilayah dengan keterbatasan data lapangan (Abatzoglou dkk. 2018).

Table 1 Sumber dan karakteristik data *TerraClimate* yang digunakan dalam penelitian

Variabel	Satuan	Resolusi	Periode	Nama Band
Curah hujan / <i>Presipitation (P)</i>	mm/hari	~4 km (0.04°)	2014–2024	<i>pr</i>
Evapotranspirasi / <i>Evapotranspiration (ET)</i>	mm/hari	~4 km (0.04°)	2014–2024	<i>aet</i>
Limpasan / <i>Run Off (RO)</i>	mm/hari	~4 km (0.04°)	2014–2024	<i>ro</i>

sumber: GEE-IDAHO EPSCOR, 2025

Penelitian ini tidak melakukan kalibrasi internal terhadap data *TerraClimate* karena dataset tersebut telah dikalibrasi oleh pengembangnya menggunakan metode *bias correction* terhadap ribuan stasiun iklim global, termasuk di wilayah tropis dan pegunungan (Abatzoglou dkk. 2018). Dalam struktur data *TerraClimate* di GEE, setiap variabel disimpan sebagai *band* terpisah dalam suatu *image*. *Band pr* (*precipitation*) untuk curah hujan, dengan satuan mm/hari; *Band aet* (*actual evapotranspiration*) untuk evapotranspirasi aktual, dengan satuan mm/hari; *Band ro* (*runoff*) untuk limpasan, dengan satuan mm/hari.

Validitas *TerraClimate* dalam merepresentasikan dinamika hidroklimat telah dikonfirmasi dalam berbagai konteks geografis dan iklim. Di DAS Beas, India, Tanuja dan Kumar (2025) menunjukkan bahwa *TerraClimate* mampu merekam tren pemanasan dan fluktuasi curah hujan dengan akurasi tinggi, bahkan di daerah berrelief kompleks dan minim stasiun observasi. Di Iran, Araghi dan Daccache (2025) menggunakan *TerraClimate* sebagai input utama dalam model prediksi hasil gandum berbasis machine learning dan menemukan bahwa variabel hidroklimatnya (curah hujan dan evapotranspirasi aktual) memiliki korelasi kuat dengan produktivitas pertanian. Temuan ini mengonfirmasi keandalan *TerraClimate* sebagai proxy neraca air di wilayah yang minim data lapangan intensif.

Oleh karena itu, pendekatan dalam penelitian ini mengandalkan validasi eksternal terhadap studi-studi terdahulu yang telah menguji kinerja *TerraClimate* di berbagai ekosistem global seperti Iran (Araghi dan Daccache 2025) dan India (Kumar 2025), yang secara konsisten menunjukkan representasi spasial dan temporal yang memadai untuk analisis neraca air.

Proses Data

Seluruh pemrosesan dilakukan menggunakan GEE dengan *JavaScript Application Programming Interface* (API). Tahapan analisis meliputi:

1. Pra-Prosesing Data. Tahap awal dalam analisis ini adalah penentuan dan persiapan wilayah studi, yaitu Daerah Aliran Sungai (DAS) Kapuas di Kalimantan Barat. Batas administratif DAS Kapuas dimuat sebagai *feature collection* dari aset pribadi di GEE, memastikan bahwa semua analisis selanjutnya dilakukan secara spasial akurat dalam cakupan DAS yang sesuai. Untuk memberikan konteks topografi, data ketinggian digital (DEM) dari SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) digunakan dan dipotong (*clipped*) sesuai batas DAS.
2. Prosesing Data. Setelah batas wilayah studi DAS Kapuas ditentukan, tahap berikutnya adalah pengumpulan dan pemrosesan data hidrometeorologi dari *TerraClimate*. Data curah hujan (P), evapotranspirasi aktual (ET), dan limpasan (RO) diperoleh dari *Image Collection TerraClimate* dengan resolusi spasial sekitar 4 km. Koleksi data ini kemudian difilter berdasarkan rentang waktu Januari 2014 hingga Desember 2024. Koleksi data ini kemudian difilter berdasarkan rentang waktu dan wilayah DAS Kapuas untuk memastikan kesesuaian spasial dan temporal dalam analisis.

Dalam siklus hidrologi, keseimbangan jumlah air di suatu daerah dipengaruhi oleh volume air yang masuk (input) dan yang keluar (output) selama periode tertentu (Fathnur, Kunta, dan Musyadik 2021). Untuk mengevaluasi ketersediaan air di DAS Kapuas, neraca air (water balance/WB) dihitung pada tingkat pixel dan bulanan menggunakan model sederhana namun representatif:

$$WB = P - ET - RO \dots\dots\dots (1)$$

dengan keterangan:

WB: Water Balance / Neraca Air (mm)

P : Curah Hujan (mm)

ET : Evapotranspirasi (mm)

RO : Limpasan (mm)

Rumus ini menggambarkan selisih antara input utama (curah hujan) dan kehilangan air melalui proses evapotranspirasi dan limpasan. Nilai *WB* positif menunjukkan kondisi surplus air, yang mengindikasikan potensi ketersediaan air yang melimpah atau risiko genangan/banjir. Sebaliknya, nilai *WB* negatif mencerminkan defisit air, yang dapat menjadi indikator awal kondisi kekeringan atau tekanan terhadap sumber daya air.

Setiap citra dalam koleksi *TerraClimate* diproses secara iteratif untuk menghitung nilai *WB* pada setiap bulan. Hasil perhitungan ditambahkan sebagai band baru (*wb*) ke dalam citra asli, sehingga terbentuk koleksi citra komposit yang mencakup empat parameter utama: curah hujan, evapotranspirasi, limpasan, dan neraca air. Koleksi akhir ini menjadi dasar bagi seluruh analisis spasial dan temporal selanjutnya, memungkinkan identifikasi pola dinamika surplus dan defisit air di DAS Kapuas sepanjang periode 2014–2024.

3. Visualisasi Interaktif:

Untuk memahami dinamika neraca air secara menyeluruh, dilakukan analisis spasial dan temporal melalui berbagai bentuk visualisasi Peta rata-rata spasial dan grafik deret waktu untuk setiap variabel dibuat dengan menghitung rata-rata tahunan menggunakan fungsi *mean()* pada seluruh *Image Collection* dalam rentang waktu 2014–2024 melalui skrip pemrosesan di GEE. Rata-rata bulanan dari setiap parameter (*P*, *ET*, *RO*, *WB*) dihitung dan divisualisasikan dalam bentuk peta tematik menggunakan palet warna yang intuitif, memudahkan identifikasi area dengan curah hujan tinggi, evapotranspirasi dominan, atau defisit air yang signifikan. Selain itu, grafik *time series* dibuat untuk menampilkan tren bulanan dari keempat variabel di seluruh DAS, baik di konsol maupun langsung di peta. Fitur interaktif seperti *slider* waktu memungkinkan pengguna menjelajahi perubahan spasial dari *P*, *ET*, *RO*, dan *WB* dari bulan ke bulan secara dinamis. Grafik yang ditampilkan di sudut peta memberikan gambaran langsung tentang fluktuasi neraca air selama periode 2014–2024, termasuk periode surplus (nilai *WB* positif) dan defisit (nilai *WB* negatif), yang dapat dikaitkan dengan musim hujan dan kemarau di wilayah Kalimantan.

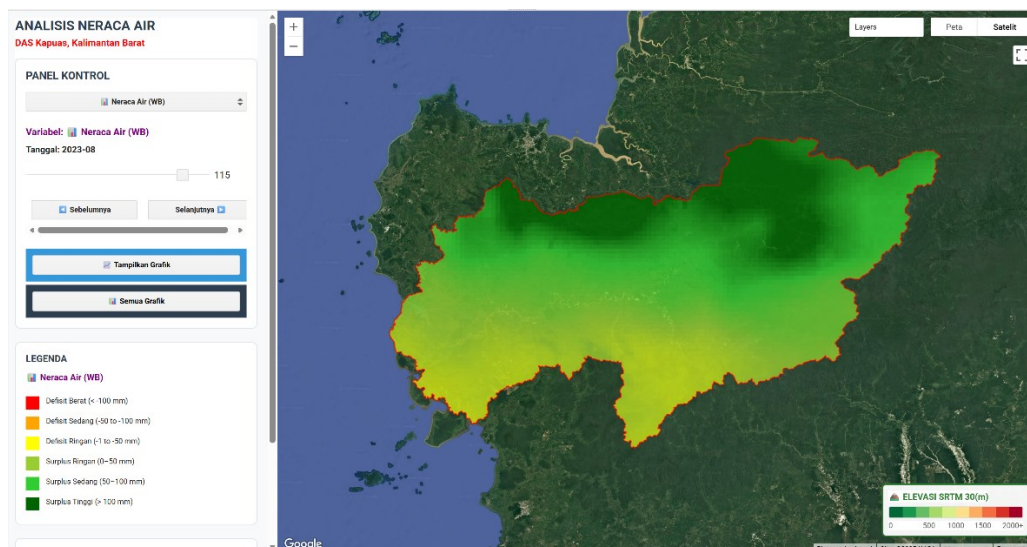
Analisis dan Visualisasi

Untuk memahami dinamika hidrologi, dilakukan beberapa bentuk analisis:

1. Grafik Deret Waktu. Grafik deret waktu dihasilkan untuk menampilkan fluktuasi P , ET , RO , dan WB selama periode 2014–2024. Grafik ini membantu mengidentifikasi pola musiman, anomali tahunan, serta respons sistem terhadap peristiwa iklim ekstrem selama periode penelitian.
2. Data Bulanan Rata-rata. Nilai rata-rata tiap variabel dihitung untuk setiap bulan selama periode penelitian. Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi tren musiman dan pola klimatologis khas wilayah. Ini membantu dalam mengidentifikasi tren musiman dan anomali dalam ketersediaan air.
3. Visualisasi Peta. Peta rata-rata spasial dari P , ET , RO , dan WB dibuat untuk seluruh periode studi. Peta ini menggambarkan distribusi geografis surplus dan defisit air, membantu identifikasi zona kritis. Visualisasi interaktif dikembangkan dalam aplikasi web GEE: <https://code.earthengine.google.com/>.

Hasil Studi Dan Pembahasan

Hasil analisis berbasis GEE dapat diakses melalui aplikasi web interaktif yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan GEE-Aps: <https://rifaiproject-230293.projects.earthengine.app/view/neraca-air-das-kapuas>.

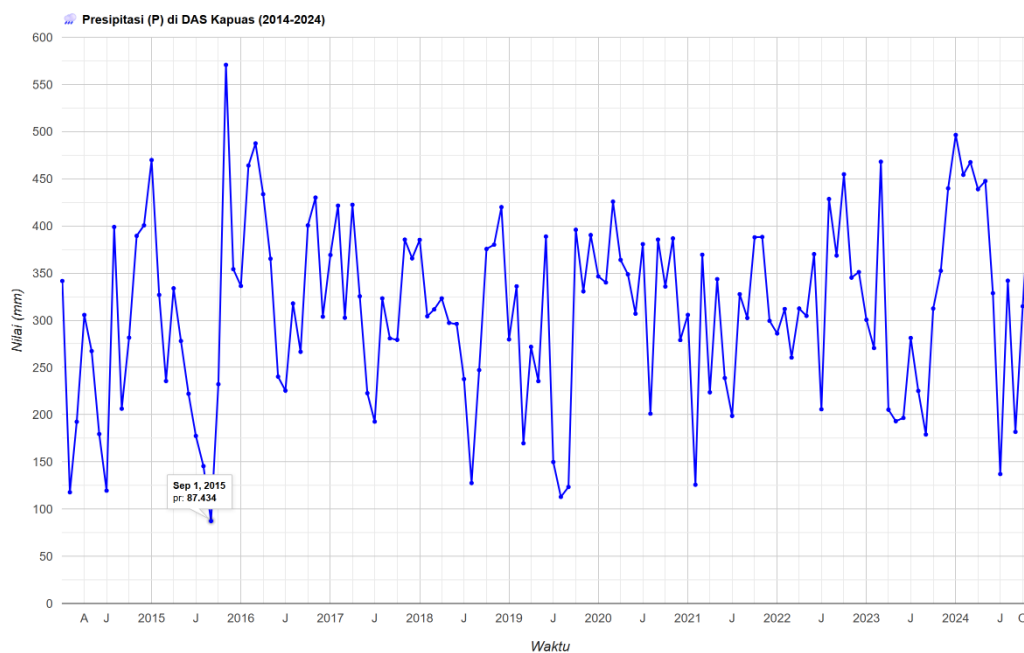


Gambar 2 Aplikasi Analisis Neraca Air DAS Kapuas (Sumber: GEE, diproses oleh penulis, 2025)

Aplikasi tersebut menyajikan informasi neraca air bulanan untuk DAS Kapuas secara dinamis, dilengkapi dengan visualisasi spasial dan temporal yang memungkinkan pengguna untuk mengamati pola perubahan neraca air dan komponen lainnya sepanjang waktu dan menurut wilayah (Gambar 2).

Analisis Curah Hujan (*P*)

Grafik deret waktu curah hujan (**Gambar 3**) menunjukkan pola musiman yang khas untuk wilayah tropis Kalimantan, dengan karakteristik utama terkait perubahan curah hujan sepanjang tahun. Musim hujan biasanya terjadi antara November hingga Maret, di mana curah hujan mencapai puncaknya, dengan rata-rata bulanan berkisar antara 150–400 mm. Puncak curah hujan umumnya terjadi pada bulan Januari, dengan nilai rata-rata lebih dari 350 mm, yang tercermin jelas dalam grafik sebagai titik-titik tertinggi setiap tahun.



Gambar 3 Diagram Curah Hujan Bulanan DAS Kapuas (Sumber: GEE, diproses oleh penulis, 2025)

Namun, selain pola musiman yang stabil, grafik juga menunjukkan variasi signifikan akibat faktor iklim global seperti El Niño. Tahun 2015 hingga awal 2016 mencatat periode curah hujan ekstrem, terutama pada November 2015 dan Februari-Maret 2016, di mana nilai curah hujan melampaui rata-rata normal. Anomali tersebut berkontribusi pada surplus air besar, yang potensial menyebabkan banjir.

Sebaliknya, pada tahun 2015, 2019, dan 2023 yang berkorelasi dengan kejadian El Niño kuat, grafik menunjukkan penurunan signifikan dalam curah hujan. Curah hujan pada ketiga tahun tersebut turun hingga 30% dibandingkan tahun normal, yang tercermin sebagai titik-titik terendah dalam grafik. Hal ini menunjukkan dampak signifikan fenomena iklim global terhadap kondisi hidrologi lokal, termasuk perubahan pola curah hujan secara dramatis.

Untuk memperkuat analisis kuantitatif, statistik rata-rata, maksimum, dan minimum dihitung untuk seluruh periode (2014–2024) dan subperiode El Niño (Agustus–Desember 2015, 2019, dan 2023), seperti disajikan dalam **Tabel 2**.

Table 2 Statistik Curah Hujan pada Seluruh Periode dan Subperiode El Niño

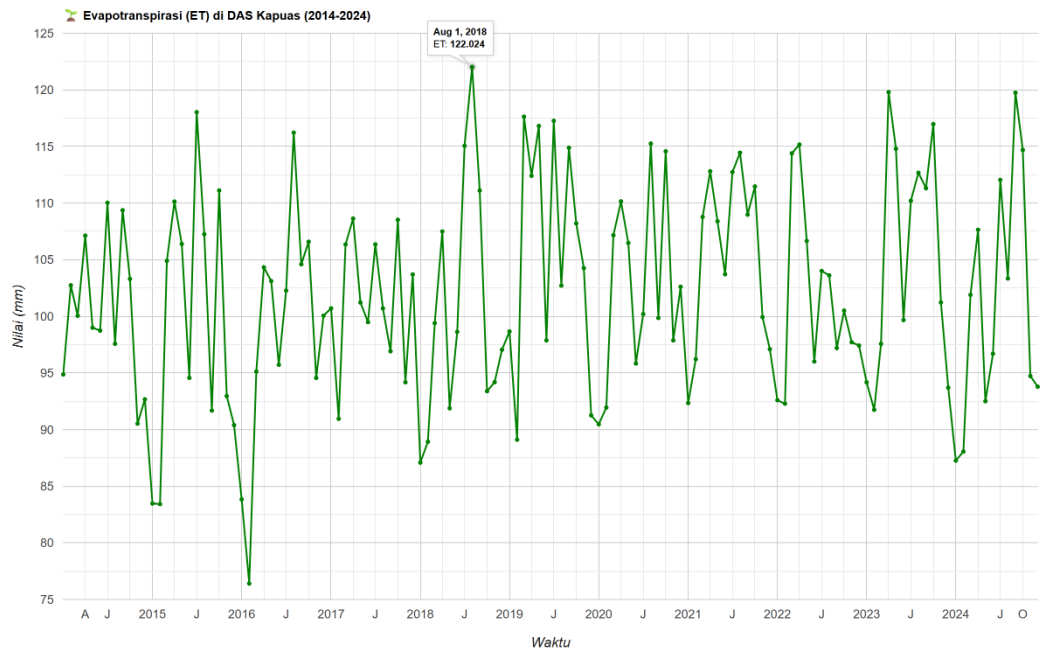
Periode	Rata-rata (mm)	Maksimum (mm)	Minimum (mm)
Seluruh periode (2014–2024)	311,27	570,78 (November 2015)	87,43 (September 2015)
Subperiode El Niño (Ags–Des: 2015, 2019, 2023)	221,64	390,43 (Desember 2019)	87,43 (September 2015)

sumber: GEE-IDAHO EPSCOR, diproses oleh penulis, 2025

Pada subperiode El Niño, rata-rata curah hujan turun 29% dibanding rata-rata keseluruhan periode. Nilai terendah (87,43 mm pada September 2015) terjadi selama puncak kekeringan El Niño, mencerminkan defisit hidrologis signifikan. Sebaliknya, curah hujan tertinggi (570,78 mm pada November 2015) terjadi pada transisi akhir El Niño menuju La Niña, yang menyebabkan banjir luas di Kalimantan Barat. Temuan ini kuantitatif memperkuat hubungan antara El Niño dan fluktuasi ekstrem ketersediaan air di DAS Kapuas.

Analisis Evapotranspirasi (ET)

Evapotranspirasi (ET) bulanan di DAS Kapuas selama periode 2014–2024 menunjukkan pola siklik yang khas, dengan nilai berkisar antara 75 hingga 125 mm/bulan. Secara umum, ET relatif stabil selama musim hujan, yang biasanya terjadi pada awal tahun (Januari–April). Pada periode ini, curah hujan yang tinggi dan kelembaban atmosfer yang mendukung menyebabkan permukaan lahan tetap lembap, sehingga proses evaporasi dan transpirasi berlangsung dalam batas yang terkendali. Hal ini tercermin dari grafik ET, di mana fluktuasi nilai cenderung rendah, berkisar antara 85–95 mm/bulan (**Gambar 4**).



Gambar 4 Diagram Evapotranspirasi Bulanan DAS Kapuas (Sumber: GEE, diproses oleh penulis, 2025)

Namun, pola tersebut berubah signifikan pada akhir musim kemarau, khususnya antara Agustus hingga Oktober, ketika *ET* justru meningkat dan mencapai puncaknya sekitar 115–125 mm/bulan. Kenaikan ini terjadi meskipun ketersediaan air di tanah mulai menurun, yang secara logika seharusnya menekan laju evapotranspirasi. Fenomena ini didorong oleh peningkatan aktivitas transpirasi dari vegetasi, sebagai respons fisiologis terhadap perubahan sinyal lingkungan yang mengindikasikan akan datangnya musim hujan. Tanpa menunggu hujan turun, banyak jenis vegetasi tropis di DAS Kapuas mulai meningkatkan fotosintesis dan pertumbuhan, memanfaatkan periode transisi ini untuk mempersiapkan fase produktivitas maksimal. Proses ini dikenal sebagai *greening*, yaitu peningkatan aktivitas hijauan yang terjadi sebelum musim hujan benar-benar dimulai, sering kali ketika kondisi tanah masih relatif kering.

Temuan ini sejalan dengan penelitian di kawasan hutan tropis, yang mengungkap bahwa vegetasi di wilayah tersebut memiliki kemampuan adaptif yang tinggi terhadap fluktuasi kelembaban tanah melalui pengaturan fisiologis (Leopoldo, Franken, dan Villa Nova 1995). Vegetasi tampak tidak hanya merespons kondisi lingkungan secara reaktif, tetapi juga menunjukkan perilaku proaktif dalam mengantisipasi perubahan musim. Hal ini terlihat dari pola *ET* yang mulai meningkat menjelang musim hujan, didorong oleh peningkatan radiasi surya dan panjang hari yang menjadi sinyal awal peralihan musim. Kenaikan *ET* di akhir musim kemarau menjadi bukti nyata bahwa tanaman mampu membaca perubahan lingkungan secara dini dan memanfaatkan momentum tersebut.

Table 3 Statistik Evapotranspirasi pada Seluruh Periode dan Subperiode El Niño

Periode	Rata-rata (mm)	Maksimum (mm)	Minimum (mm)
Seluruh periode (2014–2024)	102,06	122,02 (Agustus 2018)	76,41 (Februari 2016)
Subperiode El Niño (Ags–Des: 2015, 2019, 2023)	109,83	116,98 (Oktober 2023)	91,68 (September 2015)

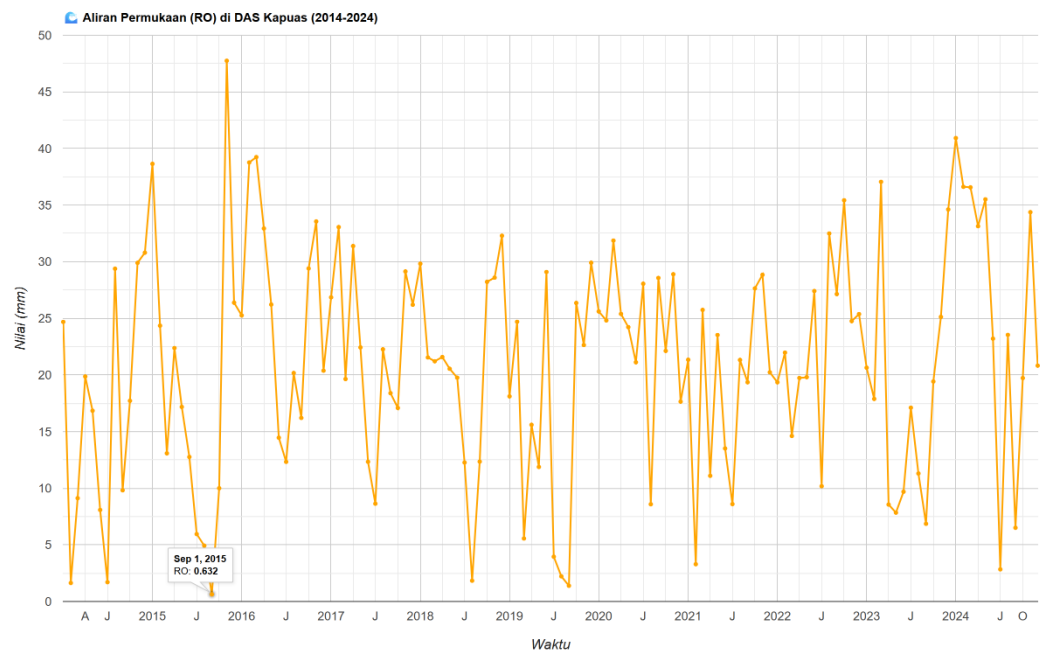
sumber: GEE-IDAHO EPSCOR, diproses oleh penulis, 2025

Statistik kuantitatif untuk *ET* disajikan dalam **Tabel 3** menunjukkan selama El Niño, *ET* lebih tinggi dibanding rata-rata tahunan, terutama pada Agustus–Oktober, menunjukkan bahwa vegetasi tetap aktif meskipun ketersediaan air menurun. Hal ini mengindikasikan kemampuan adaptif ekosistem hutan tropis dalam mengantisipasi peralihan musim, meski dalam kondisi stres air.

Analisis Limpasan (RO)

Limpasan air mencapai puncaknya selama periode curah hujan tinggi, terutama pada bulan Desember hingga Februari. Selama musim ini, intensitas hujan yang tinggi menyebabkan peningkatan signifikan dalam jumlah air yang mengalir di permukaan tanah. Namun, sebaliknya, selama musim kemarau, limpasan sangat rendah, terutama di kawasan gambut. Di sini, lahan gambut berperan sebagai "spons alami" yang efektif dalam menyerap dan menyimpan air. Karena kemampuan penyimpanan air yang tinggi, air lebih banyak disimpan dalam tanah gambut, sehingga aliran permukaan menjadi sangat minim. Fenomena ini menjelaskan

mengapa kawasan gambut memiliki kontribusi penting dalam pengendalian banjir dan stabilisasi suplai air.



Gambar 5 Diagram Limpasan Bulanan DAS Kapuas (Sumber: GEE, diproses oleh penulis, 2025)

Secara keseluruhan, pola limpasan cenderung mengikuti tren curah hujan, namun dipengaruhi oleh faktor lokal seperti tutupan lahan dan topografi. **Gambar 5** menunjukkan bahwa limpasan tertinggi terjadi pada tahun 2016 dan 2024, ketika curah hujan melebihi kapasitas infiltrasi tanah. Dalam kondisi seperti ini, sebagian besar air tidak dapat terserap oleh tanah, sehingga menghasilkan peningkatan signifikan pada aliran permukaan. Meskipun limpasan sangat dipengaruhi oleh curah hujan, faktor-faktor lokal seperti karakteristik tanah, jenis vegetasi, dan topografi juga berperan penting dalam menentukan intensitas dan distribusi limpasan. Misalnya, kawasan dengan vegetasi padat atau tanah dengan daya serap tinggi cenderung mengurangi aliran permukaan, sedangkan daerah dengan lereng curam atau tanah keras cenderung meningkatkan aliran tersebut.

Table 4 Statistik Limpasan Air pada Seluruh Periode dan Subperiode El Niño

Periode	Rata-rata (mm)	Maksimum (mm)	Minimum (mm)
Seluruh periode (2014–2024)	20,92	47,75 (November 2015)	0,63 (September 2015)
Subperiode El Niño (Ags–Des: 2015, 2019, 2023)	14,37	34,62 (Desember 2023)	0,63 (September 2015)

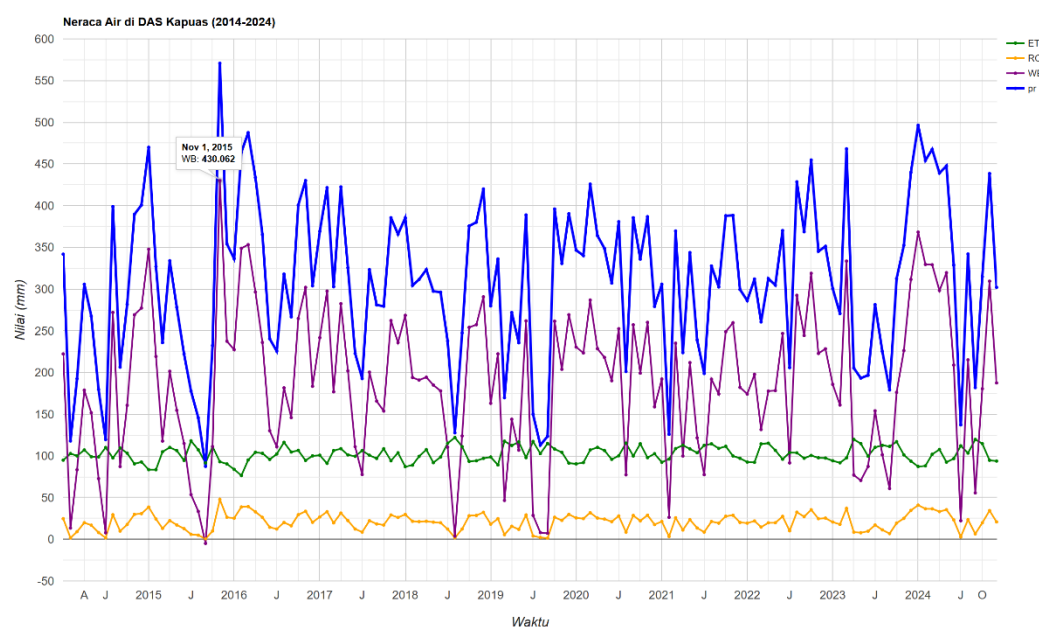
sumber: GEE-IDAHO EPSCOR, diproses oleh penulis, 2025

Statistik kuantitatif untuk *RO* disajikan dalam **Tabel 4** menunjukkan rata-rata limpasan selama El Niño turun 31% dibanding rata-rata keseluruhan. Nilai minimum (0,63 mm pada September 2015) menunjukkan hampir tidak adanya

aliran permukaan, yang meningkatkan risiko kebakaran gambut. Sebaliknya, limpasan tinggi pada November 2015 (47,75 mm) berkontribusi pada banjir besar, menegaskan bahwa limpasan sangat responsif terhadap variasi curah hujan ekstrem.

Analisis Spasial dan Temporal Neraca Air (*WB*)

DAS Kapuas secara umum mengalami kondisi surplus air sepanjang tahun. Hal ini terlihat dari grafik neraca air selama periode 2014–2024, yang menunjukkan nilai curah hujan yang tetap positif dan relatif stabil di sebagian besar bulan. Meskipun demikian, terdapat fluktuasi musiman yang khas, dengan peningkatan curah hujan yang signifikan selama musim hujan dan penurunan yang cukup tajam saat musim kemarau (**Gambar 6**). Pola ini mencerminkan dinamika iklim tropis yang dipengaruhi oleh siklus muson, namun di beberapa tahun tertentu, anomali iklim menyebabkan penyimpangan yang cukup ekstrem.



Gambar 6 Diagram Neraca Air Bulanan DAS Kapuas (Sumber: GEE, diproses oleh penulis, 2025)

Salah satu tren yang mencolok terjadi pada tahun 2015, 2019, dan 2023, ketika curah hujan mengalami penurunan drastis—bahkan mendekati nol di beberapa bulan. Fenomena ini sangat erat kaitannya dengan kejadian El Niño, sebuah pola iklim global yang dikenal menyebabkan kondisi lebih kering di kawasan tropis, termasuk Kalimantan. Saat El Niño muncul, tidak hanya curah hujan yang menurun, tetapi seluruh komponen siklus hidrologi ikut terganggu. Evapotranspirasi berkurang karena keterbatasan air, aliran permukaan menjadi tidak stabil, dan pengisian air tanah terhambat, sehingga keseimbangan hidrologis DAS Kapuas mengalami tekanan serius.

Dampak dari defisit curah hujan ini tidak berhenti pada aspek fisik semata. Tanah yang mengering meningkatkan risiko kebakaran hutan, sebuah masalah kronis yang

kerap melanda Kalimantan, terutama saat musim kemarau panjang. Penurunan muka air tanah juga semakin parah karena minimnya infiltrasi akibat kurangnya hujan, sehingga sumber daya air bawah permukaan sulit pulih. Anomali iklim seperti El Niño bukan hanya mengganggu keseimbangan jangka pendek, tetapi juga mengancam keberlanjutan biodiversitas dan fungsi ekosistem dalam jangka panjang.

Di sisi lain, distribusi neraca air di DAS Kapuas tidak merata secara spasial, sebagaimana terlihat dari data bulanan yang diolah melalui GEE-Aps. Wilayah hulu dan tengah DAS Kapuas umumnya menunjukkan surplus air yang tinggi, sering kali melebihi 100 mm/bulan. Kondisi ini didukung oleh tutupan hutan yang masih relatif utuh dan topografi perbukitan yang memfasilitasi infiltrasi serta retensi air. Hutan tropis di kawasan ini berperan sebagai regulator alami yang berperan mengurangi limpasan permukaan, dan memperlambat aliran sungai. Sebaliknya, wilayah hilir justru menunjukkan surplus yang rendah (<50 mm/bulan) atau bahkan defisit ringan, terutama di lokasi yang mengalami konversi lahan, seperti pembukaan lahan untuk pertanian atau perkebunan.

Respons hidrologis DAS Kapuas terhadap fluktuasi iklim terbukti konsisten. Saat El Niño terjadi, penurunan curah hujan diikuti oleh penurunan neraca air secara keseluruhan, meskipun terkadang diselingi oleh limpasan permukaan yang tinggi saat hujan lebat terjadi secara sporadis. Pola ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa El Niño cenderung mengganggu keseimbangan air dan meningkatkan kerentanan wilayah terhadap kekeringan (Solander dkk. 2020). Sebaliknya, selama fase La Niña, curah hujan meningkat tajam, memperkuat surplus air di wilayah hulu dan tengah. Namun, wilayah hilir justru menghadapi risiko banjir yang lebih besar, karena sistem drainase alami terganggu dan lahan yang terdegradasi tidak mampu menyerap air dengan baik, sehingga limpasan permukaan melonjak.

Table 5 Statistik Neraca Air pada Seluruh Periode dan Subperiode El Niño

Periode	Rata-rata (mm)	Maksimum (mm)	Minimum (mm)
Seluruh periode (2014–2024)	188,29	430,06 (Desember 2015)	–4,88 (Agustus 2015)
Subperiode El Niño (Ags–Des: 2015, 2019, 2023)	121,54	311,61 (Desember 2023)	–4,88 (Agustus 2015)

sumber: GEE-IDAHO EPSCOR, diproses oleh penulis, 2025

Seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 5**, selama El Niño rata-rata WB turun 35%, dan mencatat satu-satunya defisit air (–4,88 mm pada Agustus 2015). Meskipun masih dalam surplus secara agregat, penurunan ini sangat signifikan bagi wilayah gambut yang rentan terhadap kekeringan. Secara spasial, wilayah hulu dan tengah tetap menunjukkan surplus tinggi (>100 mm/bulan), sementara wilayah hilir dan gambut terdegradasi mencatat WB <50 mm/bulan selama El Niño. Hal ini menunjukkan ketimpangan spasial dalam kerentanan terhadap anomali iklim.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa integrasi data *remote sensing* dari *TerraClimate* mampu menggambarkan dinamika spasial-temporal neraca air di DAS Kapuas selama periode 2014–2024 dengan cukup baik. Pola musiman yang jelas terlihat dengan kondisi surplus air sepanjang tahun, terutama pada musim hujan (November–April), meskipun terjadi fluktuasi tahunan signifikan akibat anomali iklim seperti El Niño yang menyebabkan penurunan curah hujan hingga 30% dan berpotensi mengarah pada defisit air, terutama di wilayah gambut yang rentan terhadap kekeringan dan kebakaran hutan. Secara spasial, neraca air menunjukkan ketimpangan dengan surplus tinggi di wilayah hulu dan tengah DAS, sementara wilayah hilir serta ekosistem gambut terdegradasi mengalami surplus rendah hingga defisit ringan.

Saran

Untuk meningkatkan kualitas dan keandalan analisis hidrologi di masa depan, disarankan agar penelitian selanjutnya mengintegrasikan data tutupan lahan dan alokasi penggunaan air guna memahami lebih dalam pengaruh perubahan lahan terhadap dinamika neraca air, melakukan validasi hasil dengan data observasi stasiun hidrologi untuk meningkatkan akurasi model, serta membagi DAS Kapuas ke dalam satuan sub-DAS sebagai pendekatan analisis yang lebih rinci, terukur, dan relevan dengan karakteristik lokal. Pendekatan ini akan mendukung perencanaan dan pengelolaan sumber daya air yang lebih efektif dan berkelanjutan di kawasan DAS Kapuas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada GEE dan tim pengembang *TerraClimate* atas ketersediaan data dan platform yang mendukung penelitian ini.

Daftar Referensi

- Abatzoglou, John T, Solomon Z Dobrowski, Sean A Parks, dan Katherine C Hegewisch. 2018. “TerraClimate, a High-Resolution Global Dataset of Monthly Climate and Climatic Water Balance From 1958–2015.” *Scientific Data*. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>.
- Araghi, Alireza, dan Andre Daccache. 2025. “Smart Agricultural Technology Remote sensing and TerraClimate datasets for wheat yield prediction using machine learning.” *Smart Agricultural Technology* 11(March): 100909. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100909>.
- BPS, Kabupaten Kapuas Hulu. 2024. *Kabupaten Kapuas Hulu Dalam Angka 2024*.
- Fathnur, Fathnur, Thamrin Kunta, dan Musyadik Musyadik. 2021. “Peran Analisis Neraca Air untuk Perencanaan Pertanian di Kabupaten Konawe Selatan.” *Jurnal Sumberdaya Lahan* 15: 46. <https://doi.org/10.21082/jsdl.v15n1.2021.46-56>.
- Fibriantika, Eka, A Mujahidin, S Maryamah, dan I A Rasyid. 2021. “Analysis of Water Balance Conditions as the Impact of Climate and Land-Use Changes

- in Kapuas Watershed, Indonesia.” *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/824/1/012018>.
- Gorelick, Noel dkk. 2017. “Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone.” *Remote Sensing of Environment* 202: 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Herawati, Henny, Suripin, dan Suharyanto. 2015. “Impact of Climate Change on Streamflow in the Tropical Lowland of Kapuas River, West Borneo, Indonesia.” *Procedia Engineering* 125: 185–92. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815033445>. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.027>.
- Kumar, Rajesh. 2025. “Science of the Total Environment Climatic shifts in the Beas Basin: A spatio-temporal analysis of time series of temperature and precipitation of TerraClimate dataset.” *Science of the Total Environment* 984(May): 179712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179712>.
- Leopoldo, Paulo Rodolfo, Wolfram Karl Franken, dan Nilson Augusto Villa Nova. 1995. “Real evapotranspiration and transpiration through a tropical rain forest in central Amazonia as estimated by the water balance method.” *Forest Ecology and Management* 73(1): 185–95. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037811279403487H>. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03487-H](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03487-H).
- Rifai, M, dan Harintaka. 2025. “Analysis of Water Quality Dynamics of Sentarum Lake, Indonesia, with Water Index Application and Water Parameter Algorithm Methods Using Google Earth Engine.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1443(1): 12012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1443/1/012012>.
- Solander, K C dkk. 2020. “The pantropical response of soil moisture to El Niño.” *Hydrology and Earth System Sciences* 24(5): 2303–22. <https://hess.copernicus.org/articles/24/2303/2020/>. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2303-2020>.