



Algorithm Theoretical Basis Document/ATBD
(Dokumen Landasan Teoritis Algoritma)

Koleksi 3

Versi 1

Desember 2024

| | |
|---|-----------|
| Ringkasan Eksekutif | 4 |
| 1. Pendahuluan | 5 |
| 1.1. Ruang Lingkup | 5 |
| 1.2. Ikhtisar | 5 |
| 1.3. Cakupan Wilayah dan Jaringan | 6 |
| 1.3.1. Cakupan Wilayah | 6 |
| 1.3.2. Jaringan Kerja Mapbiomas Indonesia | 7 |
| 1.4. Aplikasi Utama | 7 |
| 2. Metodologi | 8 |
| 2.1. Data Penginderaan Jauh | 8 |
| 2.2. Google Earth Engine | 9 |
| 2.3. Deskripsi Metodologi | 9 |
| 2.4. Landsat Mosaics | 10 |
| 2.5. Feature Space | 11 |
| 2.6. Sistem Klasifikasi | 14 |
| 2.6.1. Legenda | 14 |
| 2.6.2. Training Samples | 15 |
| 2.6.3. Klasifikasi | 15 |
| 2.7. Pasca-Klasifikasi | 16 |
| 2.7.1. Gap Fill | 16 |
| 2.7.2. Filter Spasial | 16 |
| 2.7.3. Filter Temporal | 17 |
| 2.7.4. Filter Frekuensi | 17 |
| 2.7.5. Filter Insiden | 17 |
| 2.7.6. Integrasi Peta | 17 |
| 2.7.7. Filter Temporal dan Spasial pada Peta Terintegrasi | 18 |
| 2.7.8. Analisis Transisi | 18 |
| 2.7.9. Filter Spasial pada Peta Transisi | 19 |
| 2.7.10. Statistik | 19 |
| 2.8. Strategi Validasi | 19 |
| 2.8.1. Validasi dengan Peta Referensi | 19 |
| 2.8.2. Validasi dengan Sampel Independen | 19 |
| 3. Koleksi Peta dan Analisis | 21 |
| 4. Referensi | 23 |
| Annex | 24 |
| 1. Kode Legenda | 24 |
| 2. Deskripsi dan Komparasi Skema Klasifikasi | 25 |
| 3. Jumlah dan Sebaran Sampel Validasi | 28 |

Ringkasan Eksekutif

Meningkatnya perubahan lahan dan kontribusinya terhadap perubahan iklim saat ini telah menjadi perhatian global. Indonesia menjadi salah satu dari lima negara terbesar penyumbang karbon dunia [1], di mana sebesar 86% dari total emisi karbon di Indonesia berasal dari perubahan lahan. Memahami secara mendalam kompleksitas serta dinamika penggunaan lahan menjadi kunci dalam perencanaan pembangunan, terutama dalam menghadapi pertumbuhan ekonomi dan upaya mitigasi perubahan iklim. Data dan Informasi mengenai faktor dan dampak dari perubahan lahan dapat dijadikan landasan bagi pengembangan kebijakan dan strategi yang efektif untuk konservasi dan pemanfaatan sumber daya alam yang berkelanjutan.

Sebagai respons atas kebutuhan akan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana penggunaan lahan terus berkembang dan dampaknya terhadap perubahan iklim, sejak 2015 inisiatif Mapbiomas dibentuk oleh beberapa universitas, organisasi masyarakat sipil, dan perusahaan teknologi untuk mengembangkan metode yang cepat, andal, kolaboratif, dan berbiaya rendah guna memetakan tutupan dan penggunaan lahan seri tahunan di Brazil. Inisiatif ini kemudian disebarluaskan ke negara-negara lainnya di Amerika Latin dan Indonesia.

Mapbiomas bertujuan untuk membangun kapasitas lokal di setiap negara tropis untuk menghasilkan data tutupan dan penggunaan lahan berbasis penginderaan jauh yang berguna, terkini, akurat dan relevan dengan konteks lokal. Sehingga dapat digunakan oleh pengambil keputusan baik di sektor publik, swasta, dan masyarakat sipil untuk mendorong pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim. Inisiatif ini kemudian disebarluaskan ke negara-negara lainnya di Amerika Latin dan Indonesia.

Sejak 2019, Mapbiomas Indonesia dikembangkan oleh 9 (sembilan) Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) lokal yang dikoordinir oleh Auriga Nusantara dengan dukungan teknis dari Wood & Wayside International (WWI), dan terintegrasi dengan Jaringan Mapbiomas Global. Untuk terus menyajikan data yang terkini dan relevan dengan pembangunan berkelanjutan, produk Mapbiomas Indonesia senantiasa diperbarui dengan penamaan 'Koleksi'. Hingga 2023 Mapbiomas Indonesia telah menghasilkan 2 koleksi tutupan dan penggunaan lahan secara spasial (antar-wilayah) dan temporal (antar-waktu).

Pengembangan metode dan algoritma klasifikasi citra satelit untuk perbaikan kualitas data yang telah tersedia termasuk untuk menghasilkan kelas baru juga terus dilakukan. Koleksi 1 dirilis pada 2021 telah memetakan 10 kelas beserta analisis transisinya sepanjang 2000-2019. Kelas tersebut meliputi formasi hutan alam, mangrove, hutan tanaman, tumbuhan non-hutan, sawit, pertanian lainnya, tambang, non-vegetasi lainnya, tambak, serta sungai/danau. Pada 2023, Mapbiomas Indonesia Koleksi 3 dirilis dengan penambahan seri tahun 2020, 2021, dan 2022 serta tutupan sawah sebagai kelas baru. Perbaikan kualitas data juga dilakukan untuk kebun kayu (sebelumnya hutan tanaman), tambang, sawit, mangrove, dan tambak.

Dokumen Landasan Teoritis Algoritma (*Algorithm Theoretical Basis Document/ATBD*) ini diharapkan dapat memberi informasi bagi pengguna untuk memahami bagaimana metode dan prosedur yang digunakan dalam memetakan tutupan dan penggunaan lahan Mapbiomas Indonesia Koleksi 3. Seluruh peta dan dataset Mapbiomas Indonesia tersedia dan dapat diakses secara gratis pada <https://mapbiomas.nusantara.earth/>.

1. Pendahuluan

1.1. Ruang Lingkup

Dokumen ATDB ini bertujuan untuk mendeskripsikan landasan teori, justifikasi, dan metode yang digunakan pada Mapbiomas Indonesia Koleksi 3 untuk memetakan 13 kelas tutupan lahan tahunan skala nasional dari 2000 hingga 2023. Dokumen ini mencakup metode klasifikasi, prosedur pengelolaan citra, dan pendekatan integrasi peta kelas dasar (*basic themes*) dengan peta kelas tematik (*cross-cut themes*). Selain itu, dokumen ini juga menyajikan konteks historis, deskripsi umum citra satelit, input fitur, dan metode penilaian akurasi. Prosedur spesifik yang digunakan dalam pemetaan kelas tematik dapat dilihat pada lampiran.

1.2. Ikhtisar

Mapbiomas (<https://mapbiomas.org>) pertama kali dikembangkan jaringan Universitas, NGOs, dan Perusahaan Teknologi pada Juli 2015 untuk berkontribusi dalam memahami dinamika tutupan dan penggunaan lahan di Brazil. Peta tutupan dan penggunaan lahan yang dihasilkan didasarkan pada arsip tahunan citra satelit Landsat yang tersedia di platform Google Earth Engine (GEE) sejak 1985 hingga saat ini. Metode pemetaan lahan berbasis citra satelit ini mengandalkan algoritma *machine learning* dan fasilitas *cloud computing* dari GEE. Kini, Mapbiomas diaplikasikan ke berbagai negara meliputi Ekuador, Kolombia, Venezuela, Bolivia, Uruguay, Paraguay, Chile, Argentina, Peru dan Indonesia.

Sejak 2019, Mapbiomas Indonesia telah merilis 2 (dua) koleksi, yaitu koleksi 1 (Periode 2000-2019) yang dirilis pada Februari 2021 dan koleksi 2 (Periode 2000-2022) yang dirilis pada Oktober 2023. Koleksi Mapbiomas bertujuan untuk mengembangkan metode yang cepat, andal, kolaboratif dan berbiaya rendah untuk memproses kumpulan data berskala besar dan menghasilkan peta tutupan dan penggunaan lahan secara tahunan. Semua data, peta klasifikasi, kode, statistik, dan analisis lebih lanjut dapat secara terbuka melalui platform (<https://mapbiomas.nusantara.earth>).

Pengembangan inisiatif dan produk Mapbiomas dapat dilakukan karena: i) platform Google Earth Engine, yang menyediakan akses ke data, pemrosesan citra, algoritma standar, dan fasilitas komputasi awan; ii) kumpulan data deret waktu Landsat yang tersedia secara gratis; iii) jaringan kolaboratif organisasi dan para ahli yang saling berbagi pengetahuan dan perangkat pemetaan; dan iv) lembaga pendanaan visioner yang mendukung inisiatif ini [2].

Setiap tahun MapBiomas terus melakukan pengembangan yang relevan dengan peningkatan kualitas peta dan kapasitas sumber daya manusia termasuk infrastruktur pemrosesan dan teknologi. Pada koleksi ini dilakukan pengembangan antara lain, sebagai berikut:

1. Peta 13 kelas tutupan dan penggunaan lahan tahunan skala nasional dari 2000 hingga 2023 meliputi formasi hutan alam, mangrove, hutan rawa gambut, tumbuhan non-hutan, sawit, perkebunan kayu, sawah, pertanian lainnya, tambang, non-vegetasi lainnya, tambak,

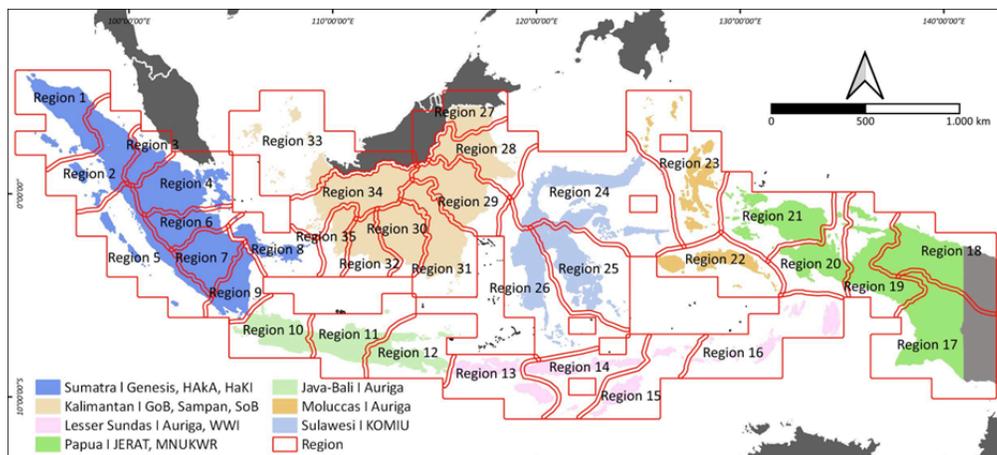
serta sungai/danau. Hutan Rawa Gambut dan Permukiman merupakan kelas baru yang ditambahkan pada koleksi ini

2. Perbaikan dan pembaruan setiap kelas, termasuk penambahan tahun 2023
3. Mosaik tahunan dari 2000 hingga 2023 berisi fitur (band original landsat, indeks, fraksi dll) yang digunakan dalam proses klasifikasi, dihasilkan dari koleksi arsip Landsat (Landsat 5, Landsat 7, dan Landsat 8).
4. Infrastruktur pemrosesan citra dan algoritma (script di Google Earth Engine dan source code).
5. Statistik transisi tutupan lahan dan analisis spasial dengan cakupan wilayah administrasi dari level provinsi hingga desa, kawasan hutan, serta layer tematik lainnya
6. Penilaian kualitas mosaik Landsat. Setiap visualisasi citra memungkinkan memiliki proporsi awan dan gangguan lainnya. Oleh karena itu, setiap piksel pada tahun tertentu dikualifikasikan berdasarkan jumlah pengamatan yang tersedia, yang bervariasi dari 0 hingga 23 pengamatan per tahun. Penilaian kualitas mosaik Landsat tersedia di platform Mapbiomas Indonesia.

1.3. Cakupan Wilayah dan Jaringan

1.3.1. Cakupan Wilayah

Cakupan wilayah studi merupakan seluruh wilayah Indonesia baik daratan maupun lautan yang terdiri dari 16.772 pulau dengan luas daratan 1.892.556 Km²[3]. Secara teknis, Mapbiomas Indonesia memetakan tutupan dan penggunaan lahan dengan membagi wilayah kerja berdasarkan pulau besar atau kelompok pulau yang selanjutnya disebut regional (*region*) meliputi (1) Sumatera, (2) Jawa-Bali-Nusa, (3) Kalimantan, (4) Sulawesi, (5) Kepulauan Maluku, dan (6) Papua. Keenam *region* tersebut kemudian dibagi menjadi 35 sub-region untuk mempermudah proses analisis berdasarkan pendekatan homogenitas wilayah terkait kondisi lansekap, struktur dan komposisi vegetasi, serta aktivitas penggunaan lahan.



Gambar 1. Cakupan Wilayah dan Jaringan Mapbiomas Indonesia

1.3.2. Jaringan Kerja Mapbiomas Indonesia

Mapbiomas Indonesia diinisiasi oleh jejaring masyarakat sipil di Indonesia yang dikoordinir oleh Auriga Nusantara dengan dukungan Mapbiomas Brasil dan Woods & Wayside International sebagai penasehat teknis. Terdapat 9 (sembilan) organisasi masyarakat sipil di tingkat lokal (tim regional) yang menjadi jaringan kerja Mapbiomas Indonesia, meliputi:

- a. Hutan, Alam dan Lingkungan Aceh (HAKA) mencakup wilayah Sumatera Bagian Utara,
- b. Hutan Kita Institute (HAKI) mencakup wilayah Sumatera Bagian Tengah,
- c. Genesis mencakup wilayah Sumatera Bagian Selatan,
- d. Sampan mencakup wilayah Kalimantan Barat,
- e. Save Our Borneo (SOB) mencakup wilayah Kalimantan Tengah dan Kalimantan Selatan,
- f. Green of Borneo (GoB) mencakup wilayah Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara,
- g. Kompas Peduli Hutan (KOMIU) mencakup wilayah Sulawesi,
- h. MNUKWAR mencakup wilayah Papua Barat,
- i. JERAT Papua mencakup wilayah Papua

Secara umum, pemetaan tutupan dan penggunaan lahan dibagi menjadi 2 (dua) tema besar yaitu kelas dasar (*basic theme*) dan kelas tematik (*cross-cut theme*) yang diproses dan dianalisis oleh jaringan kerja Mapbiomas Indonesia. Kelas dasar dipetakan oleh tim regional berdasarkan cakupan wilayah kerjanya sementara kelas tematik dan kelas dasar di luar cakupan wilayah kerja tim regional dipetakan oleh Auriga Nusantara dan Woods & Wayside International. Kelas dasar meliputi hutan, tumbuhan alami non-hutan, pertanian, non-vegetasi, dan perairan. Sedangkan kelas tematik pada Mapbiomas Indonesia Koleksi 3 meliputi mangrove, kebun kayu, sawit, sawah, tambang, dan tambak.

1.4. Aplikasi Utama

Mapbiomas Indonesia dirancang sebagai platform *monitoring* dinamika tutupan dan penggunaan lahan yang dapat diaplikasikan untuk:

- a. memetakan dan mengukur transisi tutupan dan penggunaan lahan,
- b. penghitungan kehilangan dan penambahan hutan
- c. pemantauan sumber daya air dan interaksinya dengan kelas tutupan dan penggunaan lahan,
- d. memantau perluasan lahan pertanian dan tanaman industri,
- e. memantau perluasan infrastruktur,
- f. pemantauan kawasan lindung,
- g. pemantauan konsesi dan perizinan komoditas berbasis lahan, dan
- h. perencanaan penataan ruang dan wilayah.

2. Metodologi

2.1. Data Penginderaan Jauh

Sejak peluncuran pertama pada 23 Juli 1972, satelit Landsat terus memperoleh citra permukaan bumi dari ruang angkasa, menyediakan data yang berfungsi sebagai sumber daya berharga untuk penelitian penggunaan lahan/perubahan lahan [4]. Ketersediaan pengamatan satelit mempengaruhi kemampuan pemantauan permukaan bumi. Pengamatan resolusi temporal yang lebih tinggi memungkinkan deteksi perubahan dan pemantauan permukaan yang lebih andal [3].

Satelit Landsat telah menjadi penyedia data dengan deret waktu (*time series*) terpanjang di dunia. Selain itu, dengan biaya rendah (data Landsat gratis), memiliki resolusi temporal 16 hari, kemampuan komputasi, dan analisis data siap pakai (ARD), telah mendorong penggunaan data Landsat serta pertumbuhan penelitian dan aplikasi *time series* Landsat [6]. Oleh karena itu, Mapbiomas Indonesia membangun analisis terhadap data satelit Landsat yang berasal dari tiga generasi satelit Landsat sepanjang 23 tahun (2000-2022) seperti ditunjukkan pada tabel 1.

Koleksi citra Landsat dapat diakses melalui Google Earth Engine yang bersumber dari National Aeronautics and Space Administration (NASA) dan United States Geological Survey (USGS). Pada Koleksi 1, Mapbiomas Indonesia menggunakan Landsat Level-1 Collection 1 Tier 1 top of atmosphere (TOA) reflectance. Namun, untuk Koleksi 3 menggunakan Level-1 Collection 2 Tier 1 top of the atmosphere reflectance (TOA).

Tabel 1. Waktu dan Riwayat Misi Landsat [7]

| No. | Satellite | Launched | Decommissioned | Sensors | Note |
|-----|-----------|-------------------|-------------------|--|---------------------------------|
| 1 | Landsat 1 | July 23, 1972 | January 6, 1978 | Return Beam Vidicon (RBV) and MultiSpectral Scanner (MSS) | - |
| 2 | Landsat 2 | January 22, 1975 | February 25, 1982 | Return Beam Vidicon (RBV) and MultiSpectral Scanner (MSS) | - |
| 3 | Landsat 3 | March 5, 1978 | March 31, 1983 | Return Beam Vidicon (RBV) and MultiSpectral Scanner (MSS) | - |
| 4 | Landsat 4 | July 16, 1982 | December 14, 1993 | Thematic Mapper (TM) and MultiSpectral Scanner (MSS) | - |
| 5 | Landsat 5 | March 1, 1984 | June 5, 2013 | Thematic Mapper (TM) and MultiSpectral Scanner (MSS) | Utilized by MapBiomas Indonesia |
| 6 | Landsat 6 | October 5, 1993 | October 5, 1993 | Enhanced Thematic Mapper (ETM) | Failed to reach orbit |
| 7 | Landsat 7 | April 15, 1999 | Still active | Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) | Utilized by MapBiomas Indonesia |
| 8 | Landsat 8 | February 11, 2013 | Still active | Operational Land Imager (OLI) and the Thermal InfraRed Sensor (TIRS) | Utilized by MapBiomas Indonesia |

| | | | | | |
|---|-----------|--------------------|--------------|--|---|
| 9 | Landsat 9 | September 27, 2021 | Still active | Operational Land Imager 2 (OLI-2) and the Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2) | - |
|---|-----------|--------------------|--------------|--|---|

2.2. Google Earth Engine

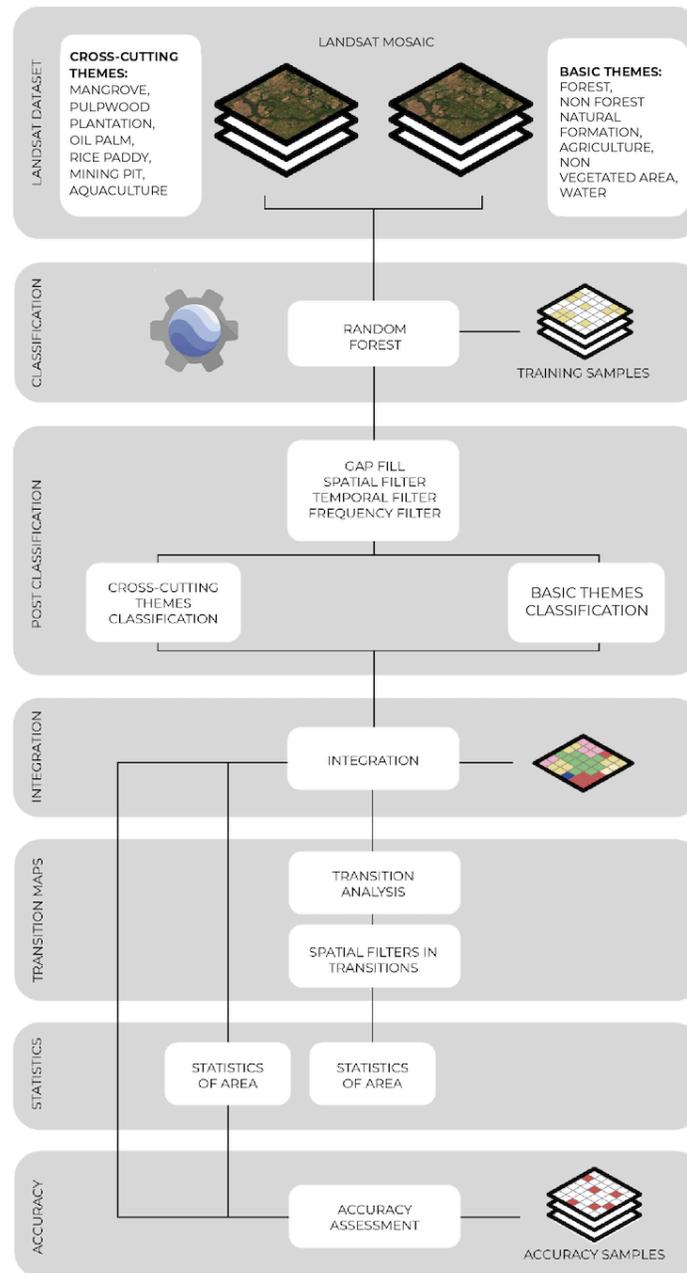
Google Earth Engine (GEE) merupakan platform untuk analisis ilmiah skala petabyte dan visualisasi kumpulan data geospasial, untuk kepentingan publik maupun untuk pengguna bisnis dan pemerintah yang dimiliki oleh Google [8]. Mapbiomas Indonesia melakukan pemrosesan citra menggunakan teknologi Google, termasuk pemrosesan gambar dalam infrastruktur komputasi awan (*cloud computing*), pemrograman dengan JavaScript dan Python melalui Google Earth Engine, dan penyimpanan data menggunakan Google Cloud Storage.

2.3. Deskripsi Metodologi

Peta tutupan dan penggunaan lahan Mapbiomas Koleksi 3 dihasilkan melalui serangkaian tahapan metodologis yang disajikan pada Gambar 2. Tahap pertama adalah menghasilkan mosaik tahunan yang terdiri dari periode tertentu untuk seluruh region dan kelas tematik. Kemudian menentukan atribut (*feature space*) dari kumpulan *band* Landsat untuk melatih algoritma random forest mengklasifikasi objek tutupan dan penggunaan lahan setiap tahun. Tahap kedua adalah menentukan training sample tahunan. Output dari tahap ini adalah klasifikasi tutupan dan penggunaan lahan seluruh region dan kelas tematik yang dihasilkan oleh random forest berdasarkan dataset training sampel di setiap tahun.

Tahap 3 adalah filter spasial-temporal, filter diterapkan pada hasil klasifikasi untuk menghilangkan *noise* dan menstabilkan data tahunan dari setiap kelas tutupan dan penggunaan lahan pada kelas dasar dan kelas tematik. Selanjutnya peta kelas dasar dan kelas tematik yang telah difilter digabungkan/diintegrasikan secara hierarkis berdasarkan aturan prevalensi. Filter spasial-temporal sekali lagi diterapkan pada peta yang telah terintegrasi untuk menghasilkan produk akhir Koleksi 3.

Analisis penilaian akurasi dilakukan berdasarkan 12.957 sampel independen per tahun sejak 2000 hingga 2022. Pengambilan sampel validasi didasarkan pada [9], [10], [11]. Transisi dan statistik dari setiap kelas diperoleh dari peta tutupan dan penggunaan lahan tahunan. Analisis statistik mencakup beberapa kategori spasial, seperti wilayah administrasi, kawasan hutan, daerah aliran sungai (DAS), fungsi ekologis gambut, wilayah konsesi/perizinan, dan sebagainya.



Gambar 2 Tahapan umum implementasi algoritma Mapbiomas Koleksi 3 pada Google Earth Engine

2.4. Landsat Mosaics

Mosaik Landsat diproses berdasarkan grid tertentu dalam periode waktu tertentu. Mapbiomas Indonesia menggunakan unit pemetaan berdasarkan International map of the world on the millionth scale (IMW) pada skala 1:250.000. Setiap grid mencakup area 1° lintang x 1,5° bujur dengan total 286 grid untuk seluruh wilayah Indonesia, dan mosaik Landsat dibuat berdasarkan

grid tersebut. Semua data Landsat diseleksi untuk mendapatkan piksel terbaik untuk meningkatkan kontras gambar agar kelas tutupan dan penggunaan lahan dapat dibedakan secara optimal.

Mosaik Landsat yang digunakan oleh Mapbiomas Indonesia bersifat tahunan (per tahun) dan bebas awan. Untuk meminimalisir gangguan awan, periode waktu yang dipilih pada setiap tahun umumnya adalah bulan kering (April-September). Namun, periode waktu tersebut dapat disesuaikan atau diperpanjang untuk mencakup data Landsat yang lebih banyak. Kriteria pemilihan periode didasarkan pada 1) data Landsat yang dipilih memungkinkan analisis tahunan, dan 2) Periode pemilihan liputan Landsat (t_0 dan t_1 dalam hari/bulan/tahun) harus memiliki kontras spektral yang cukup untuk membedakan objek dengan lebih baik.

Mapbiomas Indonesia juga mengaplikasikan *band quality assessment* (QA) dan *median reducer* dalam membuat mosaik Landsat tahunan bebas awan. Nilai QA menunjukkan piksel mana yang mungkin terkontaminasi awan. Median reducer digunakan untuk menyeleksi nilai piksel yang terlalu terang (misalnya awan) dan terlalu gelap (misalnya bayangan) dan memilih nilai piksel rata-rata di setiap *band* dari waktu ke waktu.

Dalam proses pembuatan mosaik, dilakukan penyusunan variabel (*feature space*) dengan mengekstraksi band Landsat dan menyatukannya ke dalam satu dataset yang disebut sebagai mosaik Landsat. *Feature space* digunakan sebagai parameter spektral untuk random forest (*classifier*) mempelajari karakteristik sampel dan menjalankan proses klasifikasi.

2.5. Feature Space

Feature space yang digunakan dalam Koleksi 3 untuk kelas dasar terdiri dari 90 variabel per tahun. Variabel ini terdiri indeks, fraksi, dan tekstur dan band original dari Landsat. Tabel 2 menyajikan deskripsi dan rumus yang digunakan untuk memperoleh variabel-variabel tersebut. *Statistical reducer* juga digunakan untuk menghasilkan fitur secara temporal seperti:

| | |
|------------|--|
| median | : median dari nilai piksel dalam tumpukan gambar yang ditentukan |
| median_dry | : median dari kuartil nilai NDVI dengan piksel terendah |
| median_wet | : median dari kuartil nilai NDVI dengan piksel tertinggi |
| amplitude | : amplitudo dari nilai indeks yang mempertimbangkan semua gambar sepanjang tahun |
| stdDev | : standar deviasi dari nilai piksel dalam tumpukan gambar yang ditentukan |
| min | : nilai tahunan terendah dari piksel setiap band |

Tabel 2. Daftar, deskripsi, referensi band, fraksi, dan indeks yang tersedia dalam Mosaik Mapbiomas Indonesia Koleksi 3

| | Name | Formula | Statistical Reducer | | | | | |
|----------------------|------------|--|---------------------|----------------|----------------|---------------|--------|-----|
| | | | median | median _dry | median _wet | ampli tude | stdDev | min |
| Band | blue | B1 (L5-L7); B2 (L8) | | | | | | |
| | green | B1 (L5-L7); B3 (L8) | | | | | | |
| | red | B1 (L5-L7); B4 (L8) | | | | | | |
| | nir | B1 (L5-L7); B5 (L8) | | | | | | |
| | swir1 | B1 (L5-L7); B6 (L8) | | | | | | |
| | swir2 | B7 (L5); B8 (L7); B7 (L8) | | | | | | |
| | temp | B6 (L5-L7); B10 (L8) | | | | | | |
| Index | ndvi | $(nir - red)/(nir+red)$ | | | | | | |
| | evi2 | $(2.5*(nir-red)/(nir+2.4*red+1))$ | | | | | | |
| | cai | $(swir2/swir1)$ | | | | | | |
| | ndwi | $(nir-swir1)/(nir+swir1)$ | | | | | | |
| | gcvl | $(nir/green-1)$ | | | | | | |
| | hall_cover | $(-red*0.017-nir*0.007-swir2*0.079+5.22)$ | | | | | | |
| | pri | $(blue-green)/(blue+green)$ | | | | | | |
| | savi | $(1+L)*(nir-red)/(nir+red+0,5)$ | | | | | | |
| Fractio n | gv | <i>Fractional abundance of green vegetation within the pixel</i> | | | | | | |
| | npv | <i>Fractional abundance of non-photosyntetic vegetation within the pixel</i> | | | | | | |
| | soil | <i>Fractional abundance of soil within the pixel</i> | | | | | | |
| | cloud | <i>Fractional abundance of cloud within the pixel</i> | | | | | | |
| | shade | $100-(gv+npv+soil+cloud)$ | | | | | | |
| MEM Index | gvs | $gv/(gv+npv+soil+cloud)$ | | | | | | |
| | ndfi | $(gvs-(npv+soil))/(gvs+(npv+soil))$ | | | | | | |
| | sefi | $((gv+npv_s-soil)/(gv+npv_s+soil))$ | | | | | | |
| | wefi | $((gv+npv)-(soil+shade))/((gv+npv)+(soil+shade))$ | | | | | | |
| | fns | $((gn+shade)-soil)/((gv+shade)+soil)$ | | | | | | |
| Slope | | ALOS DSM: GLobal 30m | | | | | | |

Tutupan dan penggunaan lahan pada kelas dasar dan kelas tematik dipetakan dengan menjalankan algoritma pemilihan feature space, untuk melatih pengklasifikasi (*random forest*) menentukan masing-masing kelas. Untuk pemetaan kelas dasar pada Koleksi 3 digunakan 30 variabel yang dianggap signifikan untuk memisahkan objek tutupan lahan (Tabel 3). Sementara variabel yang digunakan untuk kelas tematik secara lebih rinci disajikan pada lampiran.

Tabel 3. Variabel feature space yang digunakan dalam pemetaan tutupan lahan kelas dasar

| | Name | Formula | Statistical Reducer | | |
|------------------|--|--|---------------------|------------|------------|
| | | | median | median_dry | median_wet |
| Band | blue | B1 (L5-L7); B2 (L8) | | | |
| | green | B1 (L5-L7); B3 (L8) | | | |
| | red | B1 (L5-L7); B4 (L8) | | | |
| | nir | B1 (L5-L7); B5 (L8) | | | |
| | swir1 | B1 (L5-L7); B6 (L8) | | | |
| | swir2 | B7 (L5); B8 (L7); B7 (L8) | | | |
| | temp | B6 (L5-L7); B10 (L8) | | | |
| Index | ndvi | $(nir-red)/(nir+red)$ | | | |
| | evi2 | $(2.5*(nir-red)/(nir+2.4*red+1))$ | | | |
| | cai | $(swir2/swir1)$ | | | |
| | ndwi | $(nir-swir1)/(nir+swir1)$ | | | |
| | gcvi | $(nir/green-1)$ | | | |
| | hall_cover | $(-red*0.017-nir*0.007-swir2*0.079+5.22)$ | | | |
| | pri | $(blue-green)/(blue+green)$ | | | |
| | savi | $(1+L)*(nir-red)/(nir+red+0,5)$ | | | |
| textG | $(\text{'median_green'}.entropy(ee.Kernel.square(\{radius:5\})))$ | | | | |
| Fraction | gv | <i>Fractional abundance of green vegetation within the pixel</i> | | | |
| | npv | <i>Fractional abundance of non-photosyntetic vegetation within the pixel</i> | | | |
| | soil | <i>Fractional abundance of soil within the pixel</i> | | | |
| | cloud | <i>Fractional abundance of cloud within the pixel</i> | | | |
| | shade | $100-(gv+npv+soil+cloud)$ | | | |
| MEM Index | gvs | $gv/(gv+npv+soil+cloud)$ | | | |
| | ndfi | $(gvs-(npv+soil))/(gvs+(npv+soil))$ | | | |
| | sefi | $((gv+npv_s-soil)/(gv+npv_s+soil))$ | | | |
| | wefi | $((gv+npv)-(soil+shade))/((gv+npv)+(soil+shade))$ | | | |
| | fns | $((gn+shade)-soil)/((gv+shade)+soil)$ | | | |
| Slope | ALOS DSM: GLobal 30m | | | | |

2.6. Sistem Klasifikasi

Tutupan lahan mengacu pada hamparan objek yang menutupi permukaan bumi, sedangkan penggunaan lahan berkaitan dengan interaksi manusia dengan lahan atau jenis kegiatan yang terjadi di permukaan bumi. Sistem klasifikasi merupakan representasi abstrak dengan nama, kode dan definisi kelas, kriteria diagnostik yang jelas (pengklasifikasi) yang digunakan untuk

membedakan berbagai jenis tutupan lahan, dan hubungan antara kelas tutupan lahan [12]. Pada dasarnya sistem klasifikasi adalah suatu konsep untuk menginterpretasikan atau mendefinisikan berbagai kelas tutupan dan penggunaan lahan pada kondisi nyata yang disederhanakan menjadi hanya beberapa kelas yang dapat mewakili kelas-kelas yang sebenarnya dengan baik.

2.6.1. Legenda

Mapbiomas Indonesia mengadopsi konsep klasifikasi tutupan dan penggunaan lahan dari Organisasi Pangan dan Pertanian PBB (FAO), yang menggunakan struktur hierarki untuk mengakomodasi berbagai tingkat kategori. Hierarki ini dimulai dari kelas dengan kategori umum, kemudian dibagi secara sistematis menjadi subkelas yang lebih rinci [13]. Kategorisasi dapat dirancang menggunakan satu atau lebih karakteristik spektral atau tekstur [14]. Sistem klasifikasi Mapbiomas Indonesia Koleksi 3 terdiri dari dua tingkat (level) kategori (Tabel 4). Level 1 terdiri atas lima kelas meliputi (1) Hutan, (2) Formasi Alami Non-Hutan, (3) Pertanian, (4) Non-Vegetasi, (5) Perairan. Level 2 terdiri dari 13 kelas yang merupakan subkelas dari level 1. Perbandingan klasifikasi Mapbiomas Indonesia Koleksi 3 dengan koleksi lainnya secara rinci disajikan pada lampiran.

Tabel 4. Kelas Tutupan dan Penggunaan Lahan Mapbiomas Indonesia Koleksi 3

| Natural/Anthropic | EN | ID | pixel id | Hexadecimal code | Color | Level |
|-------------------|--|---------------------------------|-----------|------------------|-------|----------|
| | 1. Forest | 1. Hutan | 1 | #1f8d49 | | 1 |
| Natural | 1.1. Forest Formation | 1.1. Formasi Hutan | 3 | #1f8d49 | | 2 |
| Natural | 1.2. Mangrove | 1.2. Mangrove | 5 | #04381d | | 2 |
| Natural | 1.3 Peat swamp forest | 1.3 Hutan rawa gambut | 76 | #2f7360 | | 2 |
| | 2. Non-Forest Natural Formation | 2. Tumbuhan Non-Hutan | 10 | #d6bc74 | | 1 |
| Natural | 2.1. Other Natural Vegetation | 2.1. Tumbuhan Non-Hutan Lainnya | 13 | #d89f5c | | 2 |
| | 3. Agriculture | 3. Pertanian | 18 | #E974ED | | 1 |
| Anthropic | 3.1. Rice Paddy | 3.1. Sawah | 40 | #c71585 | | 2 |
| Anthropic | 3.2. Oil Palm | 3.2. Sawit | 35 | #9065d0 | | 2 |
| Anthropic | 3.3. Pulpwood Plantation | 3.3. Kebun Kayu | 9 | #7a5900 | | 2 |
| Anthropic | 3.4. Other Agriculture | 3.4. Pertanian Lainnya | 21 | #ffefc3 | | 2 |
| | 4. Non-Vegetated Area | 4. Non-Vegetasi | 22 | #d4271e | | 1 |
| Anthropic | 4.1. Mining Pit | 4.1. Lubang Tambang | 30 | #9c0027 | | 2 |
| Anthropic | 4.2. Urban Area | 4.2. Permukiman | 24 | #d4271e | | 2 |
| Natural | 4.3. Other Non-Vegetation | 4.3. Non-Vegetasi Lainnya | 25 | #db4d4f | | 2 |
| | 5. Water Body | 5. Tubuh Air | 26 | #2532e4 | | 1 |

| | | | | | | |
|-------------|-------------------------|--------------------------|----|---------|--|---|
| Anthropic | 5.1. Aquaculture | 5.1. Tambak | 31 | #091077 | | 2 |
| Natural | 5.2. River, Lake, Ocean | 5.2. Sungai, Danau, Laut | 33 | #2532e4 | | 2 |
| Not defined | 6. Not observed | 6. Citra Tertutup Awan | 27 | #ffffff | | 1 |

Koleksi 3 Membagi kelas tutupan dan penggunaan lahan ke dalam 13 kelas, meliputi lima kelas dasar (*basic theme*) berupa formasi hutan, tumbuhan non-hutan, pertanian lainnya, non-vegetasi lainnya, dan sungai/danau/laut; serta enam kelas tematik (*cross-cut theme*) yaitu mangrove, sawah, sawit, kebun kayu, lubang tambang, dan tambak. Kelas dasar merupakan kelas tutupan dan penggunaan lahan yang didominasi oleh kelas dengan karakteristik alami atau kelas dengan struktur level yang umum. Pemetaan kelas dasar dilakukan di masing-masing regional meliputi Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Papua, dan Jawa-Bali-Nusa-Maluku. Sedangkan kelas tematik merupakan kelas tutupan dan penggunaan lahan dengan formasi yang cenderung dinamis, antropik (dibudidayakan/diusahakan), atau kelas yang membutuhkan pendekatan khusus dalam proses pemetaannya. Secara lebih rinci tahapan pemetaan kelas tematik disajikan pada lampiran.

2.6.2. Training Samples

Training samples diperoleh dengan menggunakan pengambilan sampel acak dari wilayah tutupan dan penggunaan lahan yang tidak mengalami perubahan selama periode analisis atau sampel yang stabil (2000 hingga 2022 pada Koleksi 3) dengan mempertimbangkan sebaran, ukuran, dan proporsi sampel. Jika diperlukan, sampel tambahan dikumpulkan untuk untuk mengoptimalkan hasil klasifikasi. Untuk training sampel kelas tematik lebih lanjut dapat dilihat pada lampiran.

2.6.3. Klasifikasi

Mapbiomas Indonesia menerapkan pendekatan klasifikasi terbimbing untuk menghasilkan data tutupan lahan dan penggunaan lahan. Klasifikasi terbimbing adalah teknik dengan konsep segmentasi domain spektral ke dalam wilayah yang dapat dikaitkan dengan kelas penutup lahan yang menarik untuk aplikasi tertentu [21]. Klasifikasi terbimbing membutuhkan sampel referensi yang diklasifikasikan sebelumnya untuk melatih pengklasifikasi (*classifier*) dan selanjutnya mengklasifikasikan data yang tidak diketahui [22].

Random Forest [23] adalah algoritma *machine learning* yang dipilih oleh Mapbiomas Indonesia sebagai *classifier*. *Random forest classifier* berisi sejumlah *decision tree* atas parameter yang diberikan (dalam hal ini parameter spektral), yang digunakan untuk mempelajari karakteristik atau pola dari sampel yang diberikan. Tidak hanya mengandalkan sebuah *decision tree*, *random forest* juga mempertimbangkan keputusan dari *decision tree* lain berdasarkan pilihan mayoritas untuk memprediksi data yang dianalisis dalam proses klasifikasi.

Sampel dianalisis oleh *random forest classifier* dengan mempertimbangkan variabel sebagai parameter spektral yang telah ditetapkan. Jumlah *decision tree* dalam *random forest classifier* bervariasi dari 50 hingga 100. Proses klasifikasi dijalankan di platform Google Earth Engine, dilakukan pada setiap tahun di setiap wilayah yang ditentukan. Klasifikasi yang dihasilkan

kemudian diperiksa dan dievaluasi, termasuk melakukan penyesuaian sampel pada setiap kelas, hingga diperoleh hasil terbaik sebagai klasifikasi akhir.

2.7. Pasca-Klasifikasi

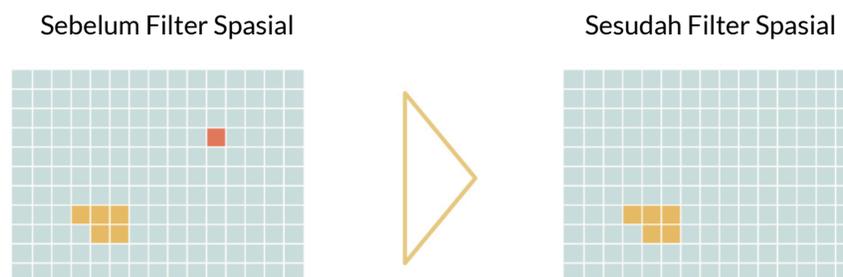
Prosedur pasca-klasifikasi (*post-classification*) diterapkan pada hasil klasifikasi tutupan dan penggunaan lahan. Metode pemetaan berbasis piksel dan periode waktu yang panjang memungkinkan hasil klasifikasi memiliki bias spasial maupun temporal. Tahap pasca-klasifikasi pertama adalah menerapkan algoritma gap-filter untuk mengisi kekosongan data tahunan pada periode tertentu, tahap keduanya adalah filter temporal, kemudian filter spasial untuk menstabilkan hasil dan mengurangi bias yang muncul. Prosedur pasca-klasifikasi ini diimplementasikan pada Google Earth Engine dan dijelaskan secara lebih rinci di bawah ini.

2.7.1. Gap Fill

Gap fill digunakan untuk mengisi kekosongan data hasil klasifikasi. Pada periode waktu yang panjang, hasil klasifikasi mungkin terdampak awan sehingga terjadi kekosongan data. Kekosongan ini akan diisi dengan hasil klasifikasi yang tersedia, baik pada tahun sebelum maupun sesudahnya, yang terdekat secara waktu. Filter akan beroperasi dengan mencari hasil klasifikasi pada tahun lampau terdekat untuk mengisi kekosongan data. Jika hasil klasifikasi lampau tidak ada, maka filter akan mencari data pada tahun berikutnya yang terdekat secara waktu.

2.7.2. Filter Spasial

Filter spasial digunakan untuk mereduksi piksel yang terisolasi, sehingga bias pada hasil klasifikasi dapat diminimalisir. Filter ini menggunakan fungsi “connectedPixelCount” yang terdapat pada Google Earth Engine. Fungsi tersebut bekerja dengan menghubungkan piksel yang memiliki nilai identik. Piksel yang tidak terkoneksi dengan sekurangnya empat piksel terdekat, dianggap terisolasi dan nilainya diganti dengan nilai piksel di sekitarnya. Hasil dari filter spasial berimplikasi pada unit pemetaan minimum, yaitu lima piksel atau setara dengan 0,5 ha.



Gambar 3. Ilustrasi mekanisme filter spasial

2.7.3. Filter Temporal

Filter temporal digunakan untuk memperbaiki transisi yang tidak realistis antar kelas tutupan dan penggunaan lahan. Filter ini diterapkan dengan membuat 3 (tiga) aturan jendela waktu yaitu filter temporal tiga tahun, empat tahun, lima tahun serta tahun awal dan akhir. Filter bergerak mundur untuk memeriksa nilai piksel pada tahun tengah dari jendela waktu. Jika nilai tahun awal dan akhir identik tetapi nilai tahun tengah tidak, maka nilai tahun tengah diklasifikasikan ulang agar sesuai

dengan tahun awal dan akhir. Untuk temporal 3 tahun, posisi tahun tengah adalah 1 tahun di antara tahun awal dan akhir. Sementara untuk temporal 4 dan 5 tahun, posisi tahun tengah masing-masing adalah 2 dan 3 tahun di antara tahun awal dan akhir.

Tabel 5.

| Sebelum Filter Temporal | | | Sesudah Filter Temporal | | |
|-------------------------|--------------|-------------|-------------------------|--------------|-------------|
| Tahun Awal | Tahun Tengah | Tahun Akhir | Tahun Awal | Tahun Tengah | Tahun Akhir |
| Hutan | Non Hutan | Hutan | Hutan | Hutan | Hutan |
| Non Hutan | Hutan | Non Hutan | Non Hutan | Non Hutan | Non Hutan |

2.7.4. Filter Frekuensi

Filter frekuensi ini mempertimbangkan frekuensi kemunculan kelas di seluruh periode analisis. Dengan demikian, jumlah kemunculan kelas tutupan lahan yang kurang dari persentase tertentu akan difilter, misalnya kurang dari 3 dari 23 tahun (10 persen). Mekanisme ini mengurangi bias dari *false-positive* dan mempertahankan trayektori yang terkonsolidasi. Pada peta tematik frekuensi filter disesuaikan dengan karakteristik kelas masing-masing, lebih lanjut dapat dilihat pada lampiran.

2.7.5. Filter Insiden

Filter insiden digunakan untuk menghapus piksel yang terlalu sering berubah selama periode analisis. Semua piksel yang berubah lebih dari delapan kali dan terhubung kurang dari 6 piksel diganti dengan nilai piksel dari posisi yang sama dari tahun lainnya. Mekanisme ini menghilangkan perubahan yang tidak realistis dan menghilangkan noise dari trayektori kelas tutupan/penggunaan lahan. Pada peta tematik frekuensi filter disesuaikan dengan karakteristik kelas masing-masing, lebih lanjut dapat dilihat pada lampiran.

2.7.6. Integrasi Peta

Peta kelas dasar (*basic theme*) dan tematik (*cross-cut theme*) diintegrasikan piksel demi piksel melalui tumpang susun (*overlay*) berdasarkan hierarki kelas mengikuti aturan prevalensi yang telah ditetapkan.

2.7.7. Filter Temporal dan Spasial pada Peta Terintegrasi

Filter temporal diterapkan untuk menghilangkan kelas-kelas yang terisolasi, yaitu kelas yang kemunculannya kurang dari 3 kali sepanjang 23 tahun. Setelah filter temporal diterapkan, filter spasial sebagaimana dijelaskan pada 2.7.2 diterapkan pada peta terintegrasi untuk menghilangkan kelas-kelas terisolasi yaitu kelas yang luasnya kurang dari 0,5 ha, termasuk menghilangkan *noise* akibat kualitas citra yang buruk.

2.7.8. Analisis Transisi

Transisi merupakan perubahan kelas tertentu menjadi kelas yang lain dalam periode waktu tertentu. Analisis transisi kelas tutupan/penggunaan lahan dilakukan berdasarkan periode: (a) per tahun, (b) per 5 tahun, (c) per 10 tahun, serta (d) tahun awal dan tahun akhir. Tipologi transisi meliputi (a) transisi dari kelas pertanian atau kelas non-vegetasi ke kelas tutupan hutan atau formasi alami non-hutan, (b) transisi dengan penambahan kelas air permukaan, (c) transisi yang mengakibatkan berkurangnya kelas air permukaan, (d) transisi dengan penambahan perkebunan industri, (e) transisi dari kelas tutupan hutan atau formasi alami non-hutan ke pertanian atau non-vegetasi, (f) wilayah tanpa transisi atau transisi yang melibatkan wilayah yang tidak teramati (tanpa data).

2.7.9. Filter Spasial pada Peta Transisi

Filter spasial sebagaimana yang dijelaskan pada 2.7.2 diterapkan pada peta transisi untuk menghilangkan piksel tunggal atau piksel di perbatasan kelas yang berbeda yang muncul akibat analisis transisi.

2.7.10. Statistik

Statistik dari kelas tutupan dan penggunaan lahan yang dipetakan dihitung berdasarkan unit spasial berdasarkan wilayah administrasi seperti region, provinsi, kabupaten/kota, kecamatan, hingga desa serta layer tematik lainnya seperti kawasan hutan, kawasan konservasi, daerah aliran sungai, wilayah moratorium hutan dan lahan gambut, wilayah perizinan konsesi dsb. Sebuah toolkit di Google Earth Engine tersedia untuk pengguna mengunggah area yang diminati sebagai batas analisis dan juga untuk mengunduh peta tutupan dan penggunaan lahan: [Mapbiomas User Toolkit - LULC](#).

2.8. Strategi Validasi

Strategi validasi peta tutupan dan penggunaan lahan didasarkan pada dua pendekatan. Pertama, validasi dilakukan melalui analisis komparatif peta Koleksi 3 dengan peta-peta referensi, dan Kedua, analisis akurasi berdasarkan teknik statistik menggunakan sampel independen yang mencakup seluruh wilayah Indonesia pada periode waktu tertentu. Sejak Koleksi 3 proses penghitungan nilai akurasi menggunakan sampel independen sebagai data referensi yang proses validasinya dilakukan oleh 10 perguruan tinggi yang tersebar di Indonesia.

2.8.1. Validasi dengan Peta Referensi

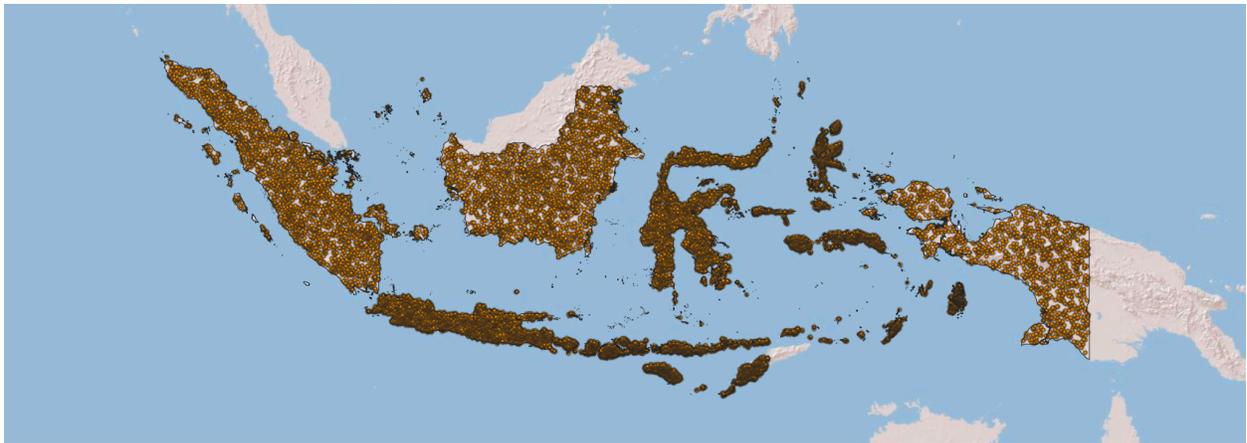
Setiap peta tutupan dan penggunaan lahan divalidasi dengan peta referensi yang tersedia melalui analisis kesepakatan spasial (*spatial agreement test*) untuk melihat kesesuaian antara peta Koleksi 3 dengan peta referensi. Peta-peta referensi yang digunakan dapat dilihat pada: [referensi](#), sementara hasil perbandingan peta dapat dilihat pada lampiran.

2.8.2. Validasi dengan Sampel Independen

Validasi dengan sampel independen dilakukan secara reguler setiap 2 tahun koleksi. Mulai dari koleksi 2 dan validasi berikutnya di Koleksi 4. Pada Koleksi 2 sebanyak 12.957 sampel independen

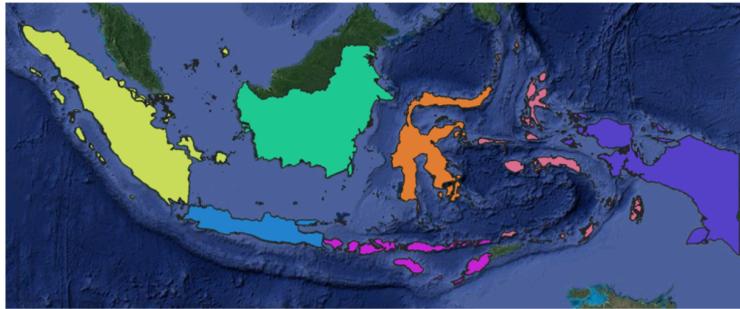
digunakan untuk memvalidasi peta tutupan lahan dan penggunaan lahan tahunan Mapbiomas Indonesia. Jumlah dan sebaran sampel ditentukan dengan teknik statistik pengambilan sampel. Sampel diperiksa secara visual menggunakan citra Landsat dan citra beresolusi tinggi dari Google Earth, dengan cara menetapkan kelas penggunaan lahan dan tutupan lahan untuk setiap tahun dari tahun 2000 hingga 2022. Jumlah dan sebaran sampel secara rinci dapat dilihat pada lampiran.

Setiap sampel diperiksa oleh 15 tim yang beranggotakan 3 orang di setiap timnya (45 interpreter). Tim independen ini berasal dari 10 perguruan tinggi di Indonesia meliputi Universitas Syiah Kuala, Universitas Bengkulu, Universitas Lampung di Sumatera; Universitas Muhammadiyah Palangkaraya dan Universitas Mulawarman di Kalimantan; Universitas Tadulako di Sulawesi; Universitas Papua di Papua, serta Universitas Indonesia, Universitas Gadjah Mada, dan Institut Pertanian Bogor di Jawa.



Gambar 4.

Setiap interpreter di dalam tim yang sama memeriksa dan menentukan kelas tutupan lahan pada titik yang sama. Sampel sebagai referensi ditetapkan berdasarkan 2 kesamaan pendapat atau lebih hasil interpretasi. Semua sampel independen yang sudah diperiksa kemudian dievaluasi dan ditetapkan sebagai data referensi oleh 10 pakar. Semua proses validasi dilakukan menggunakan platform Temporal Visual Inspection (TVI) yang dikembangkan oleh LAPIG/UFG.



Stratified Random Sampling
Strata: 42

Confidence interval: 95%
Max. error: +- 3%
Min. samples: 500 (Bonferroni correction)

12.957 samples



| Region | D01 | D02 | D03 | D04 | D05 | D06 | Total |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Bali - Nusa Tenggara | 109 | 323 | 580 | 694 | 213 | 16 | 1935 |
| Jawa | 280 | 581 | 528 | 338 | 86 | 7 | 1820 |
| Kalimantan | 262 | 611 | 647 | 446 | 125 | 6 | 2097 |
| Maluku | 99 | 318 | 535 | 622 | 209 | 14 | 1797 |
| Papua | 135 | 336 | 298 | 238 | 117 | 16 | 1140 |
| Sulawesi | 121 | 300 | 499 | 784 | 336 | 23 | 2063 |
| Sumatera | 335 | 715 | 566 | 339 | 138 | 12 | 2105 |
| | | | | | | | 12957 |

Gambar 5.

Desain pengambilan sampel menggunakan *stratified random sampling* yang mempertimbangkan kelompok unit analisis minimum wilayah meliputi tujuh region: Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Jawa, Bali dan Nusa Tenggara, Maluku, Papua dan enam kelas lereng berdasarkan data SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) dengan total 42 strata. Interval kepercayaan yang digunakan adalah 95 % dengan kesalahan minimum +- 3%. Jumlah sampel minimal di setiap region adalah 500 sampel (Bonferroni Correction). Rumus yang digunakan untuk mengukur sampel di setiap region direpresentasikan dalam Persamaan 1.

$$n = \max_{p \cdot q} \left(\frac{N z_{\gamma}^2 p q}{(N - 1) E^2 + z_{\gamma}^2 p q} \right),$$

Persamaan 1. Ukuran sampel per region

Dimana n adalah ukuran sampel; N adalah jumlah poin; E adalah margin kesalahan maksimum; p adalah proporsi yang ingin diperkirakan; q=1-p dan z adalah faktor distribusi normal standar yang sesuai dengan tingkat kepercayaan $1 - \alpha_g$ yang dihitung menggunakan koreksi Bonferroni, di mana $\alpha_g = \alpha / k - 1$ dan $1 - \alpha$ tingkat kepercayaan yang diinginkan; k adalah jumlah kelas tutupan lahan.

Analisis akurasi menggunakan matriks yang membandingkan kelas yang dipetakan dengan kelas sampel referensi [10], [11] untuk memperoleh akurasi global, pengguna dan produsen. Akurasi global tutupan dan penggunaan lahan dihitung untuk setiap tahun, kelas, dan region.

3. Koleksi Peta dan Analisis

Koleksi 3 tidak hanya menghasilkan periode tahun yang lebih panjang dengan penambahan 2020, 2021, dan 2022, tetapi juga menghasilkan peta tahunan lebih konsisten yang secara spasial dan temporal. Beberapa peta yang diperbaiki pada Koleksi 3 antara lain kelas mangrove, kebun kayu, sawit, lubang tambang, dan tambak. Selain itu pada koleksi ini peta kelas tutupan sawah menjadi 1 kelas baru yang dipetakan yang melengkapi kelas tutupan dan penggunaan lahan Mapbiomas Indonesia sebanyak 13 kelas.

4. Referensi

- [1] Carbon Brief. 2021. Analysis: Which countries are historically responsible for climate change? <https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/>
- [2] Carlos M. Souza Jr. 2020. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sens.* 2020, 12(17), 2735; <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.
- [3] Kementerian Dalam Negeri Indonesia. 2022. Keputusan Menteri Dalam Negeri Nomor 050-145 Tahun 2022 Tentang Pemberian dan Pemutakhiran Kode, Data Wilayah Administrasi Pemerintahan, dan Pulau Tahun 2021.
- [4] J. R. G. TOWNSHEND and C. O. JUSTICE, "Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 9, no. 2, pp. 187–236, Feb. 1988.
- [5] A. V. Egorov, D. P. Roy, H. K. Zhang, Z. Li, L. Yan, and H. Huang, "Landsat 4, 5 and 7 (1982 to 2017) Analysis Ready Data (ARD) observation coverage over the conterminous United States and implications for terrestrial monitoring," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 4, 2019.
- [6] M. A. Wulder et al., "Current status of Landsat program, science, and applications," *Remote Sens. Environ.*, vol. 225, pp. 127–147, 2019.
- [7] <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions#multimedia>
- [8] Google Earth Engine. 2022. <https://earthengine.google.com/>
- [9] Olofsson et al. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment Volume 148*, 25 May 2014, Pages 42-57.
- [10] Stephen V. Stehman. 2014. Estimating area and map accuracy for stratified random sampling when the strata are different from the map classes, *International Journal of Remote Sensing*, 35:13, 4923-4939, 11 July 2014
- [11] Stephen V. Stehman, Giles M. Foody. 2019. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment Volume 231*, 15 September 2019, 111199.

- [12] H. Yang, S. Li, J. Chen, X. Zhang, and S. Xu, "The Standardization and harmonization of land cover classification systems towards harmonized datasets: A review," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 6, no. 5, pp. 1–16, 2017.
- [13] A. Di Gregorio and L. J. M. Jansen, "Land cover classification system (LCCS): classification concepts and user manual for software version 1.0." FAO, 2000.
- [14] M. Shinozuka and B. Mansouri, "4 - Synthetic aperture radar and remote sensing technologies for structural health monitoring of civil infrastructure systems," in *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, V. M. Karbhari and F. B. T.-S. H. M. of C. I. S. Ansari, Eds. Woodhead Publishing, 2009, pp. 113–151.