



Food and Agriculture
Organization of the
United Nations

Panduan Praktis Pemantauan Restorasi Lahan Gambut di Indonesia

Pendekatan penginderaan jauh menggunakan platform FAO-SEPAL

KERTAS KERJA TEKNIS



Sitasi yang dipersyaratkan:

FAO. 2021. *Panduan praktis pemantauan restorasi lahan gambut di Indonesia – Pendekatan penginderaan jauh menggunakan platform FAO-SEPAL* Kertas kerja teknis. Roma.

Daftar isi

Ringkasan eksekutif	IV
Kontributor	VI
Ucapan terima kasih	VI
Singkatan dan akronim	VII
Bagian 1: Pengantar.....	1
Mengapa memantau kelembapan tanah di lahan gambut?	2
Estimasi kelembapan tanah lahan gambut dengan sensor radar	5
Pemantauan lahan gambut di Indonesia.....	7
Bagian 2: Pemodelan kelembapan tanah di lahan gambut dengan menggunakan penginderaan jauh.....	10
Soil Moisture Monitoring Module	11
Perangkat tambahan untuk memantau restorasi gambut	13
Bagian 3: Panduan praktis penggunaan modul pemetaan kelembapan tanah	17
Langkah 1: Buka SEPAL	17
Langkah 2: Proses deret waktu data Sentinel-1 untuk menghasilkan peta kelembapan tanah	17
Langkah 3: Unduh peta kelembapan tanah dari GEE ke SEPAL.....	23
Langkah 4: Pasca-proses dan analisa data deret waktu kelembapan tanah.....	26
Langkah 5: Visualisasi citra	31
Langkah 6: Unduh dan unggah data dari atau ke SEPAL ke atau dari komputer Anda	34
Bagian 4: Interpretasi hasil	37
A. Interpretasi level piksel	38
B. Analisa statistik.....	38
C. Validasi produk pemetaan kelembapan tanah (SMM).....	41
D. Keterbatasan interpretasi kelembapan tanah di lanskap lahan gambut	47
Bagian 5: Kajian dan pengembangan lebih lanjut	56
A. Pendekatan kombinasi sensor untuk pemantauan lahan gambut.....	56
B. Distribusi spasial titik pengukuran lapangan.....	56
C. Saran-saran pengembangan kapasitas.....	57
D. Integrasi alat dalam upaya monitoring yang lebih luas.....	58
E. Pemantauan pembasahan level lanskap	58
Bagian 6: Latihan	60
Lampiran 1. Penggunaan platform SEPAL	67
REFERENSI.....	75
GLOSARIUM.....	78

Ringkasan eksekutif

Pada tahun 2015 Indonesia telah berkomitmen untuk membasahi kembali lebih dari dua juta hektar lahan gambut yang kering, terdegradasi dan sering terbakar. Fokus utamanya adalah untuk mengurangi risiko kebakaran dan ancaman terhadap kehidupan dan mata pencaharian, serta untuk memitigasi perubahan iklim. Walaupun upaya restorasi lahan gambut skala besar di Indonesia sudah dimulai sejak tahun 2016 bersama dengan beberapa mitra dan dikoordinasikan oleh dua badan utama, pengembangan pendekatan pemantauan restorasi lahan gambut tersebut dimulai sedikit terlambat. Tantangan spesifik yang dihadapi adalah pemantauan tinggi muka air tanah (*groundwater level/* GWL) yang hemat-biaya sebagai variabel utama restorasi lahan gambut yang hanya memiliki titik-titik pengukuran lapangan GWL yang terbatas (kurang dari 50 titik pengukuran di tahun 2016) dan terpencar-pencar. Dengan demikian, penginderaan jauh diusulkan sebagai salah satu cara untuk mengumpulkan data di area lahan gambut yang luas dengan biaya yang rendah.

FAO telah diminta untuk mendukung tugas ini melalui perangkat pemantauan Bumi miliknya di SEPAL. Dokumen ini memberikan panduan bagi para praktisi dalam penggunaan alat pemantauan, dengan cara menjelaskan dan mendemonstrasikan penggunaan SEPAL FAO untuk pemantauan lahan gambut dengan mengevaluasi perubahan kelembapan tanah. Dokumen ini menggunakan contoh-contoh dari Indonesia, memberikan informasi pendukung dan beberapa contoh untuk menganalisis, menafsirkan hasil, serta memberikan keputusan berdasarkan informasi yang ada pada saat merencanakan langkah-langkah restorasi. Yang terakhir, dokumen ini mendiskusikan kesenjangan pengetahuan dan menawarkan rekomendasi bagi para praktisi dan pengembang untuk meningkatkan metodologi pemantauan lahan gambut dalam hubungannya dengan perangkat yang telah dipresentasikan. Panduan ini secara khusus berfokus pada kelembapan tanah karena memiliki berhubungan erat dengan GWL, yang kemudian memiliki keterkaitan dengan emisi gas rumah kaca.

FAO menyediakan data spasial yang dapat diakses gratis dan terbuka, serta menyediakan perangkat pengolah data untuk mendukung kapasitas negara dalam memantau lahan gambut. Informasi dan perubahan status lahan gambut dari waktu ke waktu merupakan hal yang sangat penting bagi sistem pemantauan dan pelaporan nasional. *System for Earth Observation Data Access, Processing and Analysis for Land Monitoring* (SEPAL) adalah sebuah platform daring, perangkat lunak sumber terbuka yang memungkinkan pengguna dengan mudah mengakses, mengajukan pertanyaan dan memproses data satelit, serta melakukan serangkaian analisa geospasial yang disesuaikan untuk kebutuhan yang berbeda. Panduan tentang bagaimana melakukan analisa pemantauan lahan gambut di SEPAL dapat berkontribusi besar terhadap kapasitas negara dalam upaya meningkatkan pemantauan dan pengelolaan sumber daya mereka.

Kata kunci: gas rumah kaca; lahan gambut; tanah organik; hutan; pemantauan; pelaporan; perubahan iklim; lahan basah; IPCC; data satelit; penginderaan jauh; observasi Bumi; data; tinggi muka air tanah (GWL); gambut; UNFCCC; pengurangan emisi; pengembangan kapasitas.

Kontributor

Rémi d'Annunzio, Yelena Finegold, Adam Gerrand, Daniel Guerrero, Erik Lindquist, Pablo Martin, Maria Nuutinen, Elisabet Rams, Laura Villegas, dan Andreas Vollrath, dari Badan Pangan Dunia - Perserikatan Bangsa-bangsa.

Ucapan terima kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada Badan Restorasi Gambut yang telah memberikan kontribusi teknis dalam pengembangan proyek “Pengembangan Inovasi Sistem Pemantauan Lahan Gambut di Indonesia” serta para mitra lokal lainnya yang mendukung kemajuan proyek ini.

Selain ucapan terima kasih kepada para pakar dan organisasi yang telah berkontribusi dalam proyek ini, kami juga mengucapkan terima kasih kepada para pembahas dan para peserta yang berkontribusi dalam pertukaran ide-ide selama sesi pelatihan dan lokakarya. Proyek dan dokumen teknis ini dikembangkan dengan dukungan finansial dari Pemerintah Norwegia melalui UNOPS sebagai badan pengelola dana.

Ucapan terima kasih khusus kami sampaikan kepada seluruh staff Badan Restorasi Gambut yang secara aktif memandu dan ikut serta dalam proyek; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Hutan-KLHK; World Resources Institute Indonesia; Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional; Direktorat Kehutanan dan Konservasi Sumber Daya Air – BAPPENAS; Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi; Badan Informasi Geospasial; Institut Pertanian Bogor; dan seluruh peserta dari berbagai lokakarya yang telah diselenggarakan oleh proyek, yang memberikan umpan balik yang berharga mengenai perangkat dan hasil kepada kami untuk membantu meningkatkan kerja kami, serta menjadikan pekerjaan ini lebih bermanfaat bagi orang-orang yang bertanggung jawab untuk merestorasi, memantau, dan mengelola lahan gambut Indonesia dengan lebih baik.

Selanjutnya, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada CIFOR, dan tim proyek UK PASSES atas diskusi yang sangat bermanfaat. Dan terakhir, kami berterima kasih kepada Bengawanty Viestrarya Tambunan yang menerjemahkan manual ini ke dalam Bahasa Indonesia dengan teliti dan efisien dan juga kepada Fiolenta Marpaung dari Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) yang memeriksa ketepatan istilah teknis dalam manual Bahasa Indonesia.

Singkatan dan akronim

ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
AOI	<i>Area of interest</i>
BFAST	<i>Breaks for Additive Seasonal and Trend</i>
BRG	Badan Restorasi Gambut – nama ini digunakan hingga akhir 2020. Mangrove diikutsertakan
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
FAO	Food and Agriculture Organization (Badan Pangan Dunia - Perserikatan Bangsa-Bangsa)
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GRK	Gas Rumah Kaca
GLDAS	<i>Global Land Data Assimilation System</i>
GWL	<i>Groundwater level lahan gambut</i>
ISMN	<i>International Soil Moisture Network</i>
ISRO	Indian Space Research Organisation
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ¹
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NISAR	<i>NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar</i>
OCSVM	<i>One-Class Support Vector Machine</i>
KHG	Kesatuan Hidrologis Gambut
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RMSE	<i>Root-Mean-Square Deviation</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SEPAL	System for Earth Observation, Data Access, Processing and Analysis for Land Monitoring dikembangkan dan dipelihara oleh FAO
SIPALAGA	Sistem Pemantauan Air Lahan Gambut
SMM	<i>Soil Moisture Mapping</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
WRI	World Resources Institute

¹ <https://www.ipcc.ch/>

Sumber daya lain untuk mendukung penggunaan panduan ini

Webinar ekologi lahan gambut dan praktis:

- [FAO Mitigation of Climate Change in Agriculture Programme webinars](#)
- [FAO Peatland and climate change video playlist](#)

FAO. 2020. Peatland mapping and monitoring: Recommendations and technical overview. Peatland mapping and monitoring: Recommendations and technical overview. <http://www.fao.org/3/CA8200EN/CA8200EN.pdf>

FAO. 2014. Towards climate responsible peatland management. R. Biancalani & A. Avagyan, eds. Mitigation of Climate Change in Agriculture Series No. 9. Roma. 100 pp. <http://www.fao.org/3/a-i4029e.pdf>

FAO. 2012. Peatlands - guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation, and sustainable use. <http://www.fao.org/3/a-an762e.pdf>

Joosten, H. & Clarke, D. 2002. Wise Use of Mires and Peatlands. Background and principles including a framework for decision-making. International Mire Conservation Group and International Peat Society. http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/wump_wise_use_of_mires_and_peatlands_book.pdf

Wösten, H., Rieley, J. & Page, S. 2008. Restoration of Tropical Peatlands. Alterra - Wageningen University and Research Centre, and the EU INCO - RESTOPEAT Partnership. https://www.wur.nl/upload_mm/e/5/a/4d874adb-f5e6-4da4-9f8a-79114e7b2291_RestorationBook5.pdf

Bagian 1: Pengantar

Lahan gambut yang memiliki peranan sangat penting dalam siklus karbon global, berperan penting untuk regulasi air, pengurangan risiko bencana, sumber pangan, produk non-kayu dan peluang mata pencaharian lainnya, serta merupakan tempat perlindungan bagi keanekaragaman hayati dan banyak spesies yang hampir punah. Namun demikian, lahan gambut merupakan ekosistem yang sangat rentan. Secara historis, lahan gambut telah terdegradasi, dikeringkan, dan dibakar, terutama untuk kepentingan pertanian dan kehutanan berkontribusi sedikitnya 5 persen dari total emisi karbon antropogenik global (lihat contohnya dalam [IPCC, 2014](#)).

Agar restorasi lahan gambut berhasil, pemantauan muka air tanah dan kelembapan tanah menjadi hal yang sangat penting dalam menilai status lahan gambut dan keseimbangan karbonnya. Pengeringan lahan gambut dengan cara menurunkan tinggi muka air tanah dapat menyebabkan oksidasi gambut dan berakibat pada emisi karbon, subsidensi, dan peningkatan risiko kebakaran.

Dokumen teknis ini memberikan suatu gambaran dan panduan tentang bagaimana menggunakan perangkat penginderaan jauh yang dikembangkan oleh Food and Agriculture of United Nation (FAO) untuk pemantauan restorasi lahan gambut di Indonesia. Inti dari perangkat ini adalah modul *Soil Moisture Mapping* (SMM) di dalam *System for Earth Observation Data Access, Processing and Analysis for Land Monitoring* (SEPAL) FAO.

Hal pertama dalam dokumen teknis ini membahas tentang gambaran singkat tentang bagaimana menggunakan terminal SEPAL. Kemudian, menjelaskan langkah demi langkah tentang bagaimana membuat peta kelembapan tanah (SMM) untuk area yang menjadi *area of interest* (AOI), dan bagaimana mengoperasikan perangkat analisis untuk mengkaji pola kelembapan tanah dari waktu ke waktu. Dokumen ini juga memberikan panduan bagi pembaca tentang bagaimana menginterpretasikan produk-produk yang dihasilkan dengan menggunakan contoh-contoh nyata yang diambil dari lapangan sebagai latihan validasi. Tujuan dari dokumen ini adalah mendukung dan memberi masukan kepada para praktisi dalam menganalisa dan menginterpretasi hasil dengan mengkombinasikan teknik – teknik lain, sensor - sensor dan data pembantu lainnya, serta membuat keputusan berdasarkan informasi yang digunakan dalam merencanakan langkah-langkah restorasi.

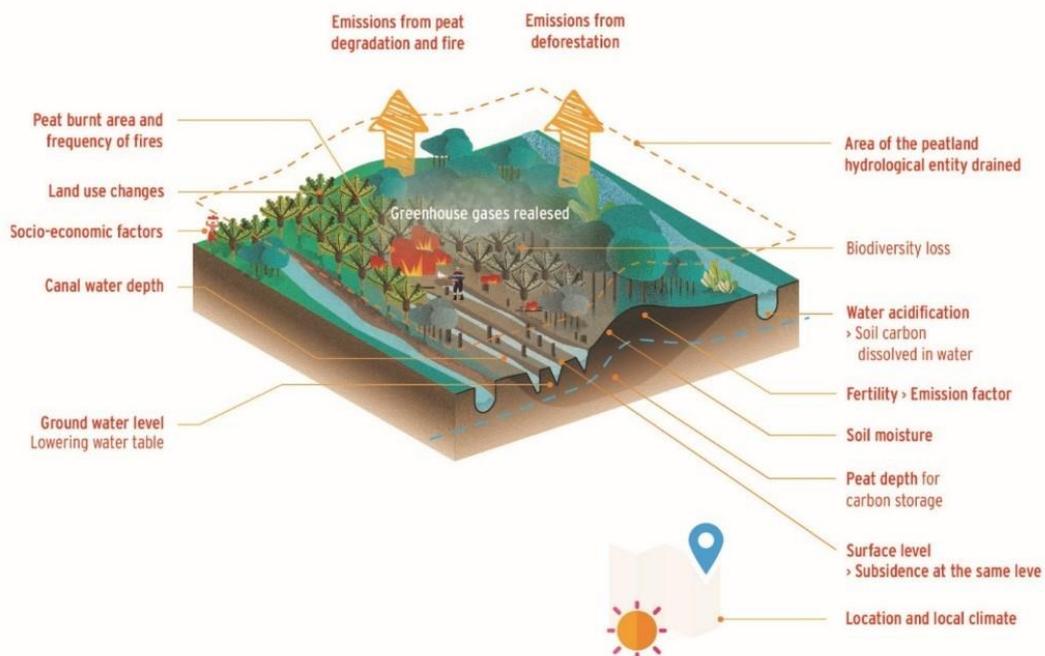
Panduan ini dipersiapkan dalam kerangka kerja proyek “Pengembangan Inovasi Sistem Pemantauan Lahan Gambut di Indonesia” yang didanai oleh Pemerintah Norwegia dan dilaksanakan oleh FAO bekerja sama erat dengan Badan Restorasi Gambut dan World Resources Institute (WRI). Proyek ini telah mendukung

Badan Restorasi Gambut (BRG); dinamai dengan BRGM sejak 2021, dalam menyiapkan suatu sistem untuk memantau dampak kegiatan restorasi gambut dan memfasilitasi transparansi data.

MENGAPA MEMANTAU KELEMBAPAN TANAH DI LAHAN GAMBUT?

Meskipun uji coba pertama restorasi gambut telah dilakukan sejak 1970-an (lihat, seperti dalam [Similä dkk. \(eds\), 2014](#)), upaya pemantauan tersebut sebagian besar merupakan upaya lokal skala kecil. Dalam beberapa tahun terakhir ini sudah banyak kemajuan dalam hal penilaian, pemetaan dan pemantauan lahan gambut yang telah dicapai, ditambah dengan semakin banyaknya pengakuan terhadap pentingnya lahan gambut dalam isu-isu yang menjadi perhatian global, termasuk perubahan iklim dan pengurangan risiko bencana (lihat, seperti dalam [FAO, 2020](#)).

Ketika misalnya muka air tanah di lahan gambut diturunkan untuk kepentingan kegiatan pertanian atau kehutanan, oksigen akan masuk ke lapisan gambut paling atas. Hal ini memudahkan terjadinya degradasi (oksidasi) mikroba di dalam gambut dan semakin mempercepat lepasnya simpanan karbon ke atmosfer – dalam bentuk berbagai gas rumah kaca (GRK) – dan ke dalam air sebagai karbon organik terlarut ([FAO, 2020](#)). Merestorasi lahan gambut merupakan tugas multi-dimensi yang kompleks dan harus melibatkan variabel-variabel biofisik maupun sosio-ekonomi (Gambar 1.1.).



Gambar 1. 1. Data yang diperlukan untuk pemantauan lahan gambut, untuk kasus lahan gambut yang dikeringkan dengan kanal.

Sumber: [FAO, 2020](#).

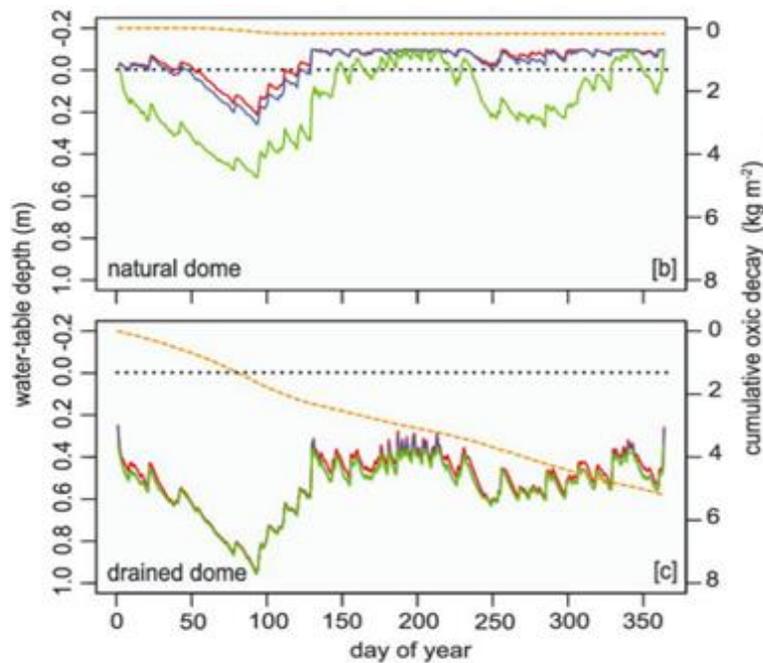
Luas lahan gambut hanya mencakup tiga persen dari luas lahan gambut global namun menyimpan hampir 30 persen dari total karbon padat yang tersimpan di tanah global, dan diperkirakan mengandung dua kali lebih banyak karbon dibandingkan dari hutan global. Lahan gambut ditemukan di banyak negara dan menjadi semakin terancam karena adanya eksploitasi berlebihan dan degradasi dalam beberapa dekade terakhir. Lahan gambut yang telah terdegradasi berkontribusi lima persen terhadap emisi antropogenik global.

Indonesia memperkirakan bahwa 99 persen dari 24 juta hektar lahan gambutnya telah terdegradasi ([KLHK, 2020](#)). Dalam Kontribusi yang Ditetapkan secara Nasional atau *Nationally Determined Contributions* (NDC) pertamanya, Indonesia telah menetapkan beberapa target yang ambisius yang seharusnya memberikan hasil yang signifikan di sektor pertanian, kehutanan, dan Area Penggunaan lain (APL) – sebagai contoh, "restorasi gambut mencapai tingkat kelangsungan hidup 90 persen, dan luas restorasi gambut mencapai dua juta hektar pada tahun 2030". Pada tahun 2016, Indonesia membentuk Badan Restorasi Gambut untuk merencanakan dan mengoordinasikan kegiatan restorasi, dan kemudian mendirikan Pusat Gambut Tropis Internasional atau *International Tropical Peatlands Centre* (ITPC) pada tahun 2018 untuk mendukung riset dan pengembangan kapasitas lahan gambut.

Ada konsensus ilmiah yang menyatakan bahwa lahan gambut yang kering memiliki emisi yang sangat tinggi, dan bahwa kedalaman tinggi muka air tanah (GWL) memiliki korelasi yang bagus dengan emisi GRK, oleh sebab itu lahan gambut dapat bertindak sebagai suatu estimasi proksi. Pada gambar 1.2 di bawah ini, menunjukkan dinamika kedalaman GWL dan hilangnya massa gambut kumulatif pada lahan gambut primer (Gambar 1.2b) dan yang kering (Gambar 1.2c). Garis-garis dengan warna yang berbeda mewakili lokasi yang berbeda di lahan gambut, garis putus-putus berwarna hitam menunjukkan permukaan lahan gambut, dan garis putus-putus berwarna jingga menunjukkan kumulatif massa gambut yang hilang. Kedalaman muka air tanah memiliki simpangan yang lebih sedikit ketika gambut dan vegetasi bertindak sebagai penyangga untuk mencegah agar air tidak turun di bawah permukaan gambut dalam periode yang lama. Dengan demikian dalam kasus ini, hilangnya gambut dan terjadinya emisi GRK yang terkait dapat dicegah. Ketika lahan gambut dikeringkan (Gambar 1.2c), muka air tanah turun di bawah permukaan untuk periode yang lebih lama. Dalam kasus ini, sepanjang tahun, dapat menyebabkan oksidasi dan hilangnya gambut. Dalam kasus yang terakhir, kita dapat melihat simpangan kedalaman muka air tanah yang lebih besar antara musim kemarau dan musim hujan di lahan gambut yang kering sebagai akibat kapasitas regulasi lahan gambut yang telah berubah akibat degradasi gambut dan degradasi vegetasi.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2013 *Wetlands Supplement* adalah metodologi yang paling banyak disepakati dalam menilai proses restorasi gambut dan dampaknya terhadap emisi GRK. IPCC menguraikan dua cara utama untuk menilai apakah degradasi lahan gambut telah dapat dihentikan dengan

pembasahan: GWL yang tinggi dan laju subsiden (IPCC, 2014; dirangkum juga dalam FAO, 2020). Dalam pengembangan proyek, FAO telah mampu mendemonstrasikan bahwa dalam situasi kelangkaan data, nilai kelembapan tanah yang diperkirakan dari data satelit merupakan proksi yang praktis untuk mengestimasi GWL, dan kemudian mampu menunjukkan kemajuan dalam langkah-langkah restorasi.



Gambar 1. 2. Pemodelan muka air tanah dan hilangnya massa gambut kumulatif pada (b) rawa gambut yang dikonservasi, dan (c) lahan gambut kering.

Sumber: Baird dkk, 2017.

Pemantauan dampak dari langkah-langkah restorasi merupakan hal yang sangat penting dalam menilai dampak iklim lahan gambut. Namun demikian, estimasi emisi GRK lahan gambut secara tepat adalah hal yang menantang, mahal dan mencakup area yang terbatas. Oleh karena itu, pemantauan variabel-variabel seperti GWL dan kelembapan tanah dapat membantu memahami dampak iklim dan risiko bencana yang berkaitan dengan lahan gambut, dan dengan demikian akan mendukung pengelolaan yang lebih baik di masa depan. Oleh karena itu, pemantauan lahan gambut merupakan hal yang sangat penting dalam mendukung langkah-langkah korektif, mencegah berlangsungnya degradasi dan hilangnya jasa ekosistem; serta memberikan informasi untuk pelaporan berbagai komitmen internasional, termasuk Tujuan Pembangunan Berkelanjutan dan konvensi-konvensi yang mendukung².

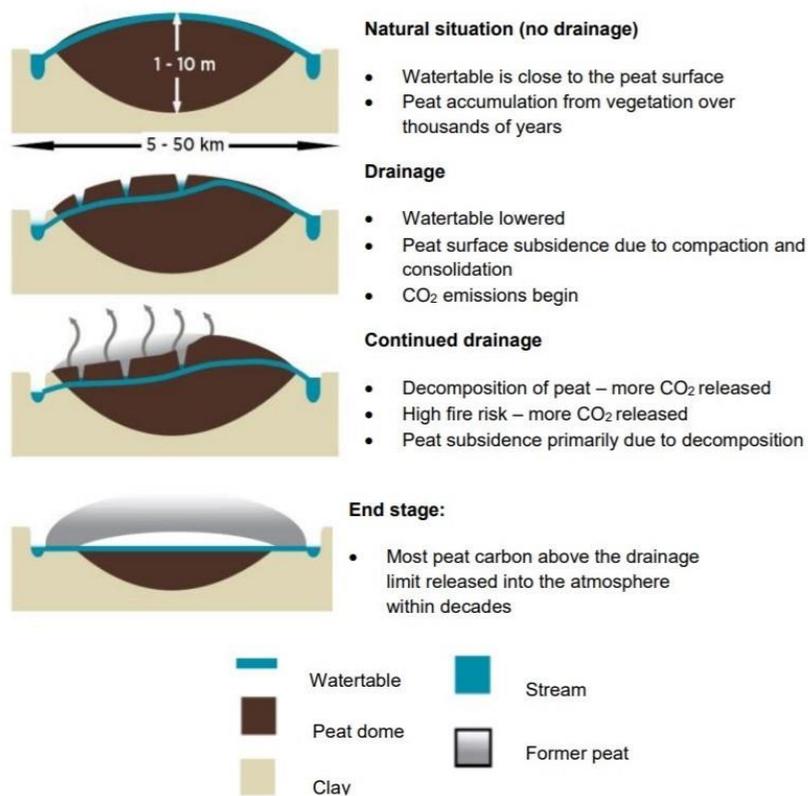
² Contoh: Konvensi Kerangka Kerja PBB untuk Perubahan Iklim (UNFCCC), Konvensi tentang Keanekaragaman Hayati (CBD), Konvensi Ramsar tentang Lahan Basah, dan Konvensi PBB untuk Melawan Desertifikasi (UNCCD).

Informasi Tambahan:

[Kepentingan & kegunaan pemetaan & pemantauan lahan gambut untuk aksi iklim, presentasi Prof. Hans Joosten](#)

ESTIMASI KELEMBAPAN TANAH LAHAN GAMBUT DENGAN SENSOR RADAR

Pengukuran GWL di lahan gambut dan kanal merupakan prioritas dalam mengkaji perubahan kondisi gambut (Gambar 1.3), dampak dari drainase di berbagai bagian sistem (seperti dalam kubah gambut), risiko kebakaran, dan dengan demikian kemungkinan untuk emisi karbon, persyaratan dan hasil restorasi (FAO, 2020). Meskipun GWL merupakan bagian paling penting dalam menghentikan degradasi lahan gambut, namun kedalaman optimal tidak sama untuk semua lahan gambut melainkan bergantung pada properti fisik gambut (yaitu retensi air, konduktivitas tidak jenuh), yang berhubungan dengan tingkat pembasahan gambut (fibrik, hemik, dan saprik) (Taufik dkk, 2019).



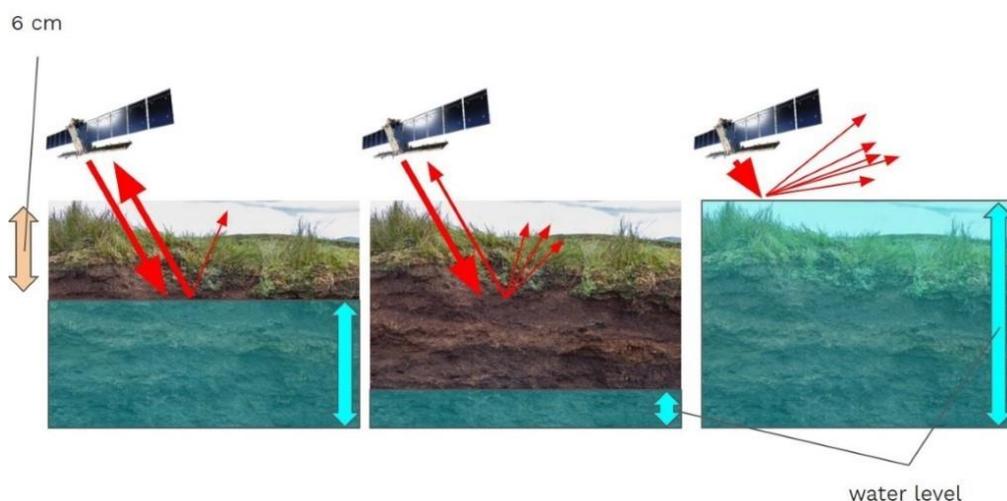
Gambar 1. 3. Representasi proses drainase dan subsidensi tanah di lahan gambut.

Sumber: Susan Page, University of Leicester³.

³ <https://www2.le.ac.uk/departments/geography/research/projects/tropical-peatland/susidence-a-progressive-problem>

Data GWL di Indonesia hanya tersedia dari lokasi pengukuran lapangan yang jarang dan terpencar-pencar, tidak memiliki data dengan deret waktu yang panjang, serta seringkali menghadapi persoalan kualitas dan biaya tinggi. Stasiun-stasiun pengukuran banyak berlokasi di tempat yang relatif mudah diakses, untuk melindungi dan merawat peralatan, dan mungkin tidak berada di lokasi yang optimal dari sisi ilmiah untuk merepresentasikan GWL dalam berbagai tutupan lahan dan jenis penggunaan lahan yang berbeda. Faktor-faktor ini menimbulkan tantangan dan kesenjangan ketika menggunakan data lapangan tersebut untuk mengestimasi GWL yang lebih luas pada seluruh lanskap dan untuk mengkaji status lahan gambut.

Kedalaman muka air tanah dan kelembapan tanah saling berhubungan erat (Hirano dkk, 2014). Estimasi kelembapan tanah dengan menggunakan sensor radar berbasis gelombang mikro dalam penginderaan jauh merupakan metode tidak langsung yang bagus dan dapat mengatasi tantangan yang timbul dari pengukuran GWL di lapangan. Ketika gelombang mikro berinteraksi dengan obyek-obyek fisik di permukaan Bumi, informasi yang diperoleh dapat menunjukkan kandungan kelembapan (Gambar 1.4), tingkat salinitas, dan karakteristik fisik (bentuk, ukuran, dan orientasi). Sifat hamburan pada tanah bergantung pada tingkat kekasaran permukaan dan distribusi vertikal kandungan kelembapan tanah (Woodhouse, 2005). Peningkatan kelembapan tanah yang terdeteksi dengan menggunakan citra radar setelah pembangunan bendungan di kawasan lahan gambut yang terdegradasi di Indonesia, menunjukkan bahwa perbandingan citra multitemporal dapat digunakan untuk memonitor kelembapan tanah. Selain itu, telah ditemukan korelasi yang kuat antara GWL dan nilai hambur balik yang diterima oleh sensor radar di daerah – daerah ini (Jaenicke dkk, 2011); pada lahan gambut terdegradasi di Sarawak, Malaysia (Hashim dkk, 2002), dan juga ditemukan di lahan gambut boreal di Alaska (Kasischke dkk, 2009). Untuk seluruh kajian ini, peningkatan pada GWL (dengan kata lain peningkatan kelembapan tanah) berkorelasi positif dengan peningkatan nilai hambur balik.



Gambar 1. 4. Interaksi antara *synthetic aperture radar* dan kelembapan tanah.

Sumber: Pablo Martin, FAO. Dibuat untuk laporan.

PEMANTAUAN LAHAN GAMBUT DI INDONESIA

Indonesia telah membentuk satu kerangka kerja institusional untuk pemantauan lahan gambut ([FAO, 2020](#)). Pemantauan lahan gambut di Indonesia difokuskan untuk memberi informasi terkini tentang lahan gambut, tahapan implementasi kegiatan restorasi, dan informasi untuk mendeteksi kebakaran lahan gambut. Namun demikian, untuk dapat mengurangi kebakaran dan degradasi lahan gambut, dan melaporkan lahan gambut yang berkaitan dengan GRK, pemantauan degradasi lahan gambut harus menjadi fokus ([BRG, 2020](#)).

Informasi lahan gambut yang disediakan oleh sistem pemantauan yang meliputi distribusi, status administrasi, penggunaan dan alokasi lahan, serta kondisi lahan gambut – penilaian status lahan gambut dalam hal perlindungan, degradasi, jejaring kanal, dan implementasi kegiatan lainnya dinilai dapat menentukan kemajuan, menyesuaikan langkah – Langkah pengukuran, dan memperkuat efektivitas upaya restorasi gambut. Kegiatan pemantauan juga bertujuan untuk mendeteksi degradasi lahan gambut guna mendukung sistem peringatan dini kebakaran dan memfasilitasi penegakan hukum.

Satu kondisi yang penting bagi pemantauan adalah pemetaan kawasan lahan gambut. Di Indonesia beberapa metode sudah dilakukan untuk tujuan ini seperti metodologi penginderaan jauh dan analisa hidrologis, *Light Detection and Ranging* (LiDAR), serta survei lapangan. Kebijakan “Satu Peta” ditujukan guna menyelaraskan peta-peta yang berbeda menjadi satu set peta nasional yang diakui secara resmi, termasuk lapisan gambut ([FAO, 2020](#)).

Data lahan gambut merupakan input untuk merancang disain restorasi yang berbasis lanskap – berdasarkan kesatuan hidrologis gambut (KHG) – dan Rencana Restorasi Ekosistem Gambut dengan cakupan waktu 25 tahun. Langkah-langkah restorasi yang saat ini diimplementasikan antara lain pembasahan, revegetasi, dan revitalisasi.

Sistem Informasi Restorasi Ekosistem Gambut (PRIMS Gambut)⁴ dibuat oleh BRG sebagai suatu platform pemetaan berbasis web secara daring dan terbuka untuk memberikan informasi kemajuan restorasi di tujuh provinsi prioritas. PRIMS memungkinkan para pengguna untuk memantau kegiatan restorasi seperti penyekatan kanal dan revegetasi lokasi, indikator degradasi gambut seperti hilangnya tutupan pohon, dan dampak restorasi seperti *hotspot* kebakaran dan pola kelembapan tanah.

⁴ <https://en.arjuna.brg.go.id/>

Platform PRIMIS merupakan suatu upaya yang ambisius, dan pada skalanya, jarang dilakukan untuk mengamati kemajuan dalam restorasi gambut. Saat ini informasi penting yang dapat diinformasikan kepada BRG, masyarakat, dan instansi lainnya adalah:

- deliniasi batas KHG;
- kanal-kanal (drainase aktif);
- penyekatan kanal dan penimbunan saluran (yang bertujuan untuk menaikkan tinggi muka air tanah hingga atau dekat ke permukaan);
- peringatan tinggi muka air tanah;
- pola kelembapan tanah;
- perubahan tingkat kelembapan vegetasi;
- informasi tentang tahun ketika kanal-kanal khusus di KHG telah disekat dengan tujuan untuk menaikkan air ke atau dekat ke permukaan; dan
- perubahan kelembapan tanah dari stasiun-stasiun data lapangan dan dari estimasi satelit SEPAL FAO.

Pengkajian terhadap situasi dan kondisi lahan gambut penting untuk dilakukan, tidak hanya untuk tujuan iklim tetapi juga untuk perencanaan penggunaan dan pengelolaan lahan di tingkat nasional. Pemantauan lahan gambut dapat mendukung sistem pemantauan hutan nasional dengan cara memberikan informasi mengenai sumber daya hutan di lahan gambut. Di Indonesia, negara dengan luas lahan gambut sekitar 24 juta hektar, pemantauan lahan gambut menjadi hal yang fundamental dalam rangka membangun Sistem Monitoring Hutan Nasional (SIMONTANA) yang kuat dan komprehensif dan memantau Bumi secara keseluruhan, termasuk ekosistem akuatik.

Guna merespon kebutuhan mendesak Indonesia untuk memantau kawasan lahan gambut, FAO telah mengembangkan modul-modul gratis berbasis *cloud* untuk memantau kelembapan tanah dari jauh dalam upaya menganalisa efektivitas dari langkah-langkah restorasi lahan gambut di Indonesia. Modul-modul ini diintegrasikan ke dalam platform daring SEPAL, yang memungkinkan adanya akses yang gratis dan terbuka untuk data geospasial dan daya pemrosesan. Dengan menggunakan superkomputer dan citra satelit terbaru, pemuktahiran peta kelembapan tanah lahan gambut, sebagai sebuah indikator penting kesehatan gambut, dapat diakses untuk skala yang sangat luas. Institusi-institusi nasional di Indonesia telah memanfaatkan platform ini untuk memproses, mengakses dan mendemonstrasikan hasil-hasilnya, serta untuk menyempurnakan tindakan restorasi.

Informasi Tambahan:

- [FAO, 2020. Peatland mapping and monitoring: Recommendations and technical overview Chapter 6: Country case studies.](#)
- [Training: SEPAL tools for peatland monitoring in Indonesia](#)
- [Platform yang inovatif untuk mengatasi tantangan dalam memantau lahan gambut di Indonesia, presentasi Budi Wardhana.](#)
- [Page, S. & Rieley, J. 2016. Tropical peat swamp forests of South East Asia.](#)

Bagian 2: Pemodelan kelembapan tanah di lahan gambut dengan menggunakan penginderaan jauh

Tugas FAO di PRIMIS difokuskan untuk memberikan dukungan teknis untuk mengestimasi kelembapan tanah di kawasan restorasi lahan gambut dengan menggunakan data penginderaan jauh. Untuk mencapai hal ini, FAO menggunakan platform pemrosesan berbasis *cloud*. *System for Earth Observation Data Access, Processing, and Analysis for Land Monitoring* (SEPAL) adalah sebuah platform daring, perangkat lunak sumber terbuka yang memungkinkan para pengguna untuk mengkueri dan memproses data satelit, serta melakukan berbagai analisa geospasial yang disesuaikan dengan kebutuhan yang berbeda-beda. Data pemantauan lapangan dapat diproses melalui perangkat yang terintegrasi dengan SEPAL dengan cara menggabungkan analisa deret waktu dari satelit optik dengan nilai estimasi dan pola kelembapan tanah dari radar. Modul-modul pemantauan restorasi gambut yang spesifik dan canggih tengah dikembangkan oleh FAO dan mitranya, dan dapat diakses di SEPAL.

SEPAL merupakan sebuah platform komputasi berbasis *cloud* yang berdaya kuat untuk pemantauan lahan secara mandiri, yang menggunakan data penginderaan jauh yang siap digunakan untuk memproses data satelit secara efisien guna menghasilkan analisa geospasial lanjutan dan analisa statistik lanjutan (seperti analisis ketidakpastian). Inovasi-inovasi penting pada platform ini diantaranya:

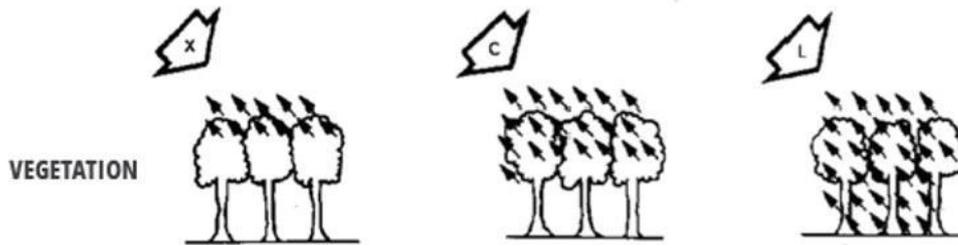
- akses data yang lebih baik, lebih mudah
- sistem untuk memproses citra secara cepat dan telah baku
- kapasitas pemrosesan yang berbasis *cloud* dengan kecepatan pemrosesan yang tinggi dan kapasitas penyimpanan yang besar
- perangkat lunak sumber terbuka yang berdaya kuat dan bermanfaat, yang dapat disesuaikan oleh pengguna; dan
- antarmuka pengguna yang efektif, yang beroperasi dengan lancar tanpa perlu ada komputer terbaru atau kecepatan koneksi internet yang tinggi.

Oleh karena SEPAL berbasis pada kode perangkat lunak sumber terbuka, SEPAL dapat dengan mudah disesuaikan untuk para pengguna dan negara yang berbeda-beda dengan metode kerja mereka yang sesuai untuk daerah mereka masing-masing. Manual ini mencakup pembuatan peta kelembapan tanah (SMM) dan peranti analisis untuk memvisualisasikan pola kelembapan tanah. Pada awalnya, kelembapan tanah hanya divalidasi dan dikalibrasi untuk lahan gambut Indonesia, namun berpotensi untuk diterapkan di negara lain. Produk dari SMM SEPAL telah menunjukkan hasil yang menggembirakan selama validasi awal.

MODUL PEMANTAUAN KELEMBAPAN TANAH

SEPAL *Soil Moisture Monitoring Module* banyak menggunakan penginderaan jauh berbasis radar. Sensor *synthetic aperture radar* (SAR) seperti Sentinel-1 (C-band) atau *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) L-band, semakin banyak digunakan dalam pemantauan gambut karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan sensor-sensor optik (Landsat). Selain karena sensitivitas sensor SAR terhadap kelembapan tanah, SAR juga tidak dipengaruhi oleh tutupan awan yang merupakan sebuah keunggulan yang besar untuk mengatasi daerah tropis yang sering berawan. Sebagai suatu sensor aktif, SAR juga dapat bekerja sepanjang siang dan malam hari karena tidak memerlukan sumber pencahayaan eksternal seperti matahari. Selain itu, frekuensi observasi sebagai contoh setiap 12 hari Sentinel-1 melewati wilayah Indonesia, memberikan resolusi temporal yang sangat baik untuk mengamati perubahan (FAO, 2020). Ciri-ciri ini membuat Sentinel-1 menjadi suatu sensor SAR yang sangat menarik untuk pemantauan lahan gambut. SEPAL telah mengeksplorasi kemampuannya dalam pengembangan platform untuk mengestimasi kelembapan tanah dengan akurat.

Sentinel-1 masih memiliki beberapa keterbatasan fisik karena sifat panjang gelombangnya (C-band), namun Sentinel-1 tersedia secara gratis; jika dibandingkan dengan citra ALOS PALSAR L-band yang lebih mahal, sehingga dapat menutupi kekurangannya. Idealnya, interpretasi akan semakin baik jika menggunakan dua sensor. Interaksi antara permukaan vegetasi dengan ukuran yang sama dan signal radar dengan panjang gelombang yang semakin besar diilustrasikan pada [Gambar 2.1](#). Karena keterbatasan penetrasi radar C-band, sinyal akan dihamburkan balik oleh dedaunan atau ranting kecil (~ 6 cm) dari kanopi pohon yang lebat oleh sebab itu radar C-band akan menunjukkan kelembapan tanah dengan lebih akurat pada yang terbuka dengan vegetasi rendah dan jarang, seperti padang rumput, lahan pertanian, atau lahan gambut dengan pepohonan yang jarang dan rendah. Dengan L-band; jika batang pohon atau obyek lain lebih kecil dari ~23 cm, sebagian dari gelombang elektromagnetik yang masuk akan mencapai tanah dan sinyal hamburan balik akan mengandung suatu komponen yang terkait dengan kelembapan tanah. Setelah melakukan interpretasi dan kalibrasi yang tepat, kelembapan tanah juga dapat disimpulkan ([Flores-Anderson dkk, 2019](#)).



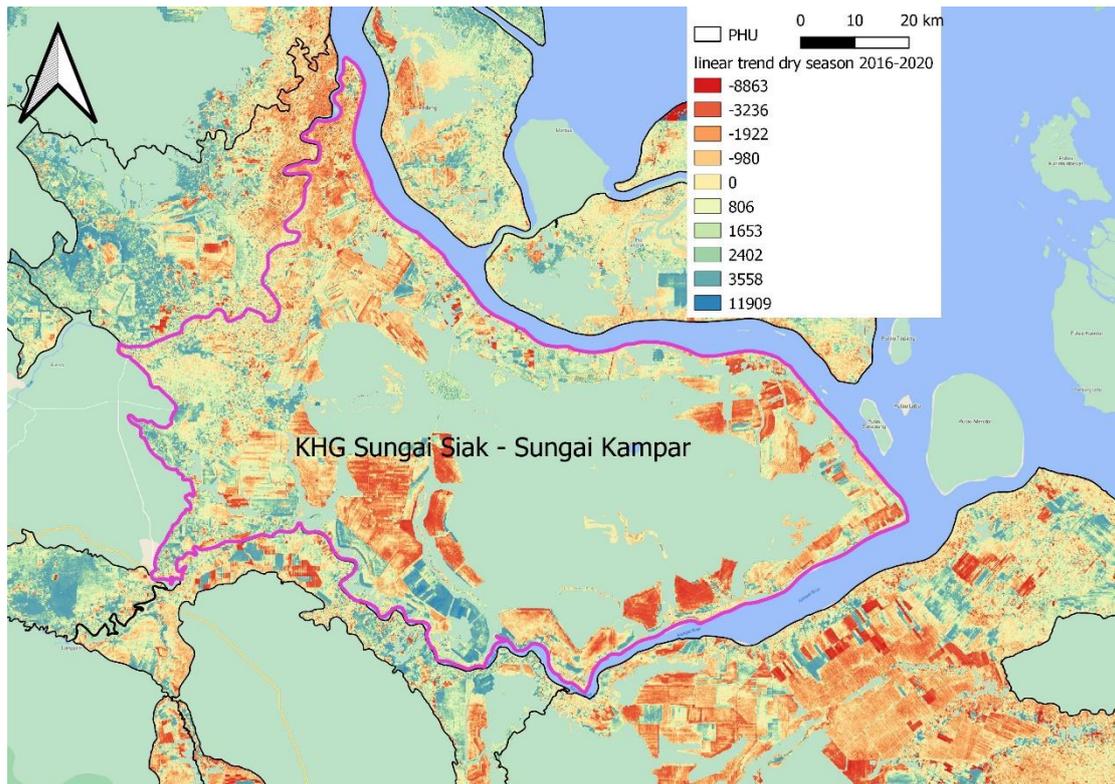
Gambar 2. 1. Interaksi antara signal radar dengan permukaan vegetasi dalam panjang gelombang yang berbeda.

Sumber: [CEOS, 2018](#)

Berdasarkan korelasi antara kelembapan tanah dan intensitas hamburan balik, [Greifeneder, dkk \(2019\)](#) mengembangkan satu model dengan kemampuan untuk menghitung peta kelembapan tanah secara menyeluruh dan berdampingan dengan menggunakan Sentinel-1 dan data tambahan (pySMM). Meskipun syarat dasar untuk pengambilan kelembapan tanah adalah korelasi terhadap hamburan balik radar, faktor-faktor tambahan seperti kekasaran permukaan, struktur dan kepadatan vegetasi akan mempengaruhi model. Selain itu, model juga menggunakan data dari *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS), yang menyediakan data kelembapan tanah pada lapisan atas (0-10 cm) yang telah dimodelkan ([Rodell dkk, 2004](#)) dan berfungsi sumber bagi data tambahan. Hal ini menghasilkan sebuah hubungan non-linear, yang menyebabkan perlunya menggunakan model-model pengambilan yang kompleks ([Greifeneder dkk, 2019](#); [Pasolli dkk, 2015](#)).

Oleh karena itu, pemodelan kelembapan tanah didasarkan pada metode pembelajaran mesin dengan menggunakan pendekatan *Support-Vector-Regression* (SVR). Pendekatan SVR dipilih karena (i) memiliki kemampuan untuk menangani masalah-masalah yang kompleks dan non-linear, ii. memiliki kemampuan untuk mengelola berbagai tipe jenis data masukan, dan iii. dapat mencapai kinerja tingkat yang tinggi walaupun ketika data yang tersedia sangat sedikit. ([Pasolli dkk., 2015](#)).

Pelatihan model dilakukan berdasarkan data insitu yang tergabung dalam *International Soil Moisture Network* (ISMN). Seluruh langkah-langkah pemrosesan untuk pemetaan spasial dan temporal kelembapan tanah sepenuhnya dilakukan secara daring dengan menggunakan perangkat *Soil Moisture Mapping* (SMM) yang dibangun di dalam SEPAL, yang didalamnya memanfaatkan daya komputasi GEE untuk menghitung serangkaian deret waktu dari informasi kelembapan tanah pada area terpilih sebagai AOI (Gambar 2.2.) dan melakukan operasi statistika dan Analisa lanjutan terhadap data pustaka geospasial lainnya.



Gambar 2. 2. Pola linear kelembapan tanah selama musim kemarau dalam periode tahun 2016–2020. Legenda menggambarkan nilai gradien dari pola regresi linear.

Sumber: Pablo Martin, FAO

Informasi Tambahan:

- [Training on the SEPAL soil moisture module and Hands on SMM](#)
- Peluncuran modul SEPAL untuk pemantauan lahan gambut tropis: <https://fao.adobeconnect.com/a1026619000/p93sggg5e3cw/>
- Antarmuka *Jupyter notebooks* dibangun untuk memproses peta kelembapan tanah pada AOI. AOI perlu diunggah ke dalam *Asset Google Earth Engine*. Untuk mengunggah sebuah *asset*, ikuti instruksi [di sini](#).
- Jika Anda ingin mendapatkan informasi lebih lanjut mengenai pemetaan kelembapan tanah, [situs ini](#) menyediakan banyak informasi.
- Untuk informasi lebih lanjut mengenai SAR secara umum, buku pegangan ini sangat komprehensif dalam menjelaskan bagaimana cara menggunakan data SAR untuk pemantauan hutan dan estimasi biomassa, gunakan [buku ini](#).

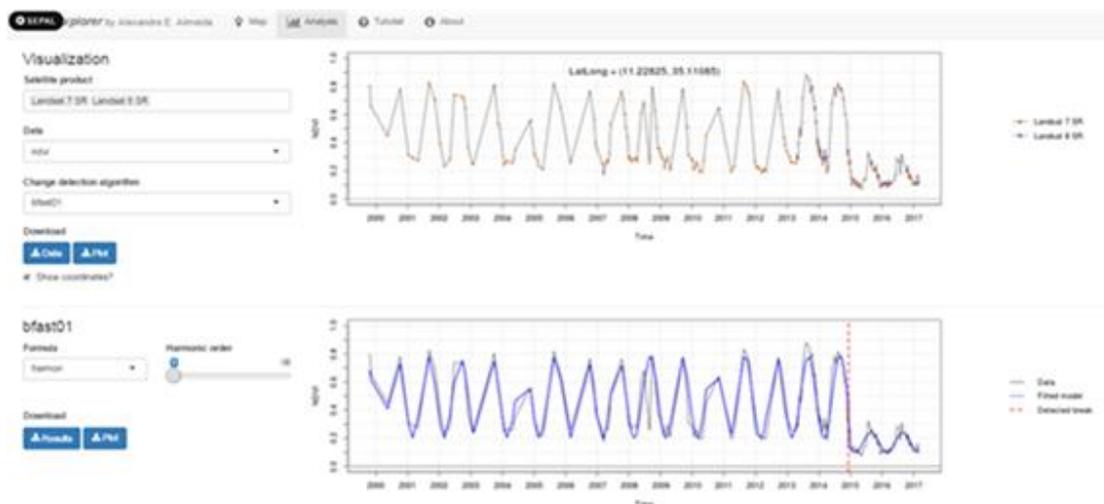
PERANGKAT TAMBAHAN UNTUK MEMANTAU RESTORASI GAMBUT

Analisis BFAST dalam pemodelan perubahan tutupan vegetasi

Dalam beberapa tahun terakhir, data dengan deret waktu yang rapat semakin banyak dipergunakan, yang sebagian besar dikaitkan dengan adanya kebijakan data terbuka (seperti pembukaan data arsip Landsat pada tahun 2008) dan adanya akses untuk menggunakan sistem komputasi berbasis *cloud* (seperti SEPAL).

Pendekatan BFAST dapat digunakan untuk mendeteksi gangguan dengan waktu hampir mendekati waktu nyata (*near-real-time*) dan menganalisis pola pemantauan perubahan secara terus-menerus (*Verbesselt dkk. 2010*). Metode BFAST dapat diterapkan pada rangkaian citra satelit apapun (yaitu MODIS4, Landsat, Rapid Eye, data RADAR5, dan data Sentinel). Perangkat ini didasarkan pada konsep bahwa simpangan dari rata-rata pola dinamika vegetasi musiman (yang diturunkan dari indeks vegetasi, seperti NDMI, NDVI6) selama beberapa tahun dapat menunjukkan adanya gangguan (tiba-tiba dan bertahap). Pendekatan BFAST secara berulang dapat memperkirakan waktu dan jumlah perubahan yang mendadak dalam kurun deret waktu dan mengarakterisasi perubahan-perubahan berdasarkan besar dan arahnya.

SEPAL menyediakan satu antarmuka pengguna yang disebut dengan BFAST explorer, yang menunjukkan pola dan uraian pola pada satu titik lokasi yang dipilih oleh pengguna (Gambar 2.3). Parameter-parameter yang berbeda untuk algoritma tersebut dapat diuji dan dimodifikasi dengan menggunakan aplikasi ini, dengan tujuan untuk mengeksplorasi dan mengidentifikasi pengaturan kustom apa yang paling relevan untuk menjalankan algoritma BFAST pada skala spasial (yaitu dengan menjalankan analisa deret waktu yang rapat pada AOI yang dipilih dibandingkan dengan satu titik koordinat).



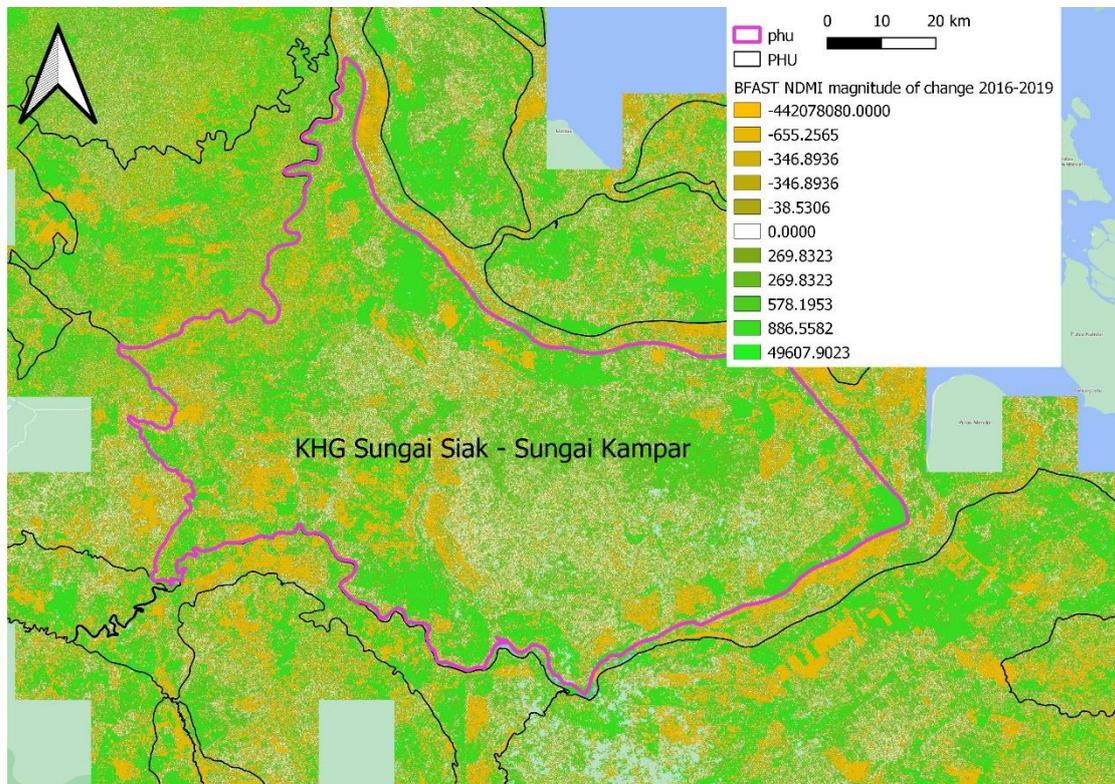
Gambar 2. 3. BFAST explorer pada SEPAL dapat digunakan untuk melihat pola dan mengidentifikasi uraian pola (garis titik merah) dari sebuah pola di satu titik lokasi.

Sumber: Tampilan BFAST Explorer dari SEPAL.

Untuk melakukan Analisa deret waktu, SEPAL menggunakan BFAST *Spatial Algorithm7* yang menerapkan pendekatan BFAST *Monitor* berbasis pixel dalam konteks spasial. Untuk menjalankan BFAST *Spatial* membutuhkan data seri waktu berkualitas tinggi dan masker dari tolak ukur vegetasi yang digunakan untuk membatasi algoritma ke piksel-piksel, yang diketahui telah bervegetasi di awal periode pemantauan

SEPAL memberikan modul tambahan untuk menghasilkan analisa deret waktu dari citra Landsat dan menghitung BFAST pada sebuah AOI (Gambar 2.4). Dengan modul ini, BFAST akan dihitung pada setiap lokasi (piksel) untuk mendeteksi simpangan dari pola musiman atau pola antar-tahunan. Perubahan yang

mendadak akan dideteksi untuk periode pengamatan yang dipilih dan menghasilkan satu citra sebagai hasil akhir lebih bagus dibanding dengan menganalisis satu lokasi tunggal (piksel), seperti yang ditunjukkan oleh BFAST Explorer di Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Perubahan positif dan negatif dalam kelembapan vegetasi (NDMI) 2016–2019 dibandingkan dengan periode historis 2013–2016, menggunakan algoritma BFAST.

Sumber: Pablo Martin, FAO.

Informasi Tambahan:.

- [Training on BFAST in SEPAL & hands on BFAST modules](#)
- Mendeteksi perubahan pada tutupan lahan – BFAST monitor dan SEPAL: <https://www.youtube.com/watch?v=ilixatm-tfg>
- Manual *Breaks for Additive Season and Trend* (BFAST) untuk restorasi gambut dengan peralatan FAO.

Data citra Planet untuk memantau perubahan tutupan lahan dan kegiatan restorasi di lahan gambut

Melalui Inisiatif Iklim dan Hutan International Norwegia (*Norway's International Climate & Forests Initiative*)⁵, citra dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi dari Planet Labs, saat ini tersedia untuk semua orang, dan akan membantu dalam mengidentifikasi dan mengklasifikasi secara akurat tutupan lahan, struktur vegetasi serta sifat biofisik lainnya (seperti pemblokiran kanal yang tidak ditutupi dengan pohon, seperti terlihat di Gambar 2.5) di lahan gambut Indonesia. Selain itu, Planet menyediakan data citra dengan deret waktu yang konsisten, yang penting untuk menganalisis perubahan tutupan lahan yang mempengaruhi kelembapan tanah (seperti kebakaran, penebangan atau pemukiman).



Gambar 2. 5. Contoh penggunaan data satelit beresolusi tinggi untuk memantau penyekatan kanal dan penimbunan saluran.

Sumber: Yelena Finegold, FAO.

Informasi Tambahan:

[Training on Planet imagery for peatland monitoring & Hands on PLANET imagery](#)

5

<https://www.planet.com/nicfi/#:~:text=Through%20Norway's%20International%20Climate%20%26%20Forests,biodiversity%2C%20and%20facilitate%20sustainable%20development.>

Bagian 3: Panduan praktis penggunaan modul pemetaan kelembapan tanah

Tujuan dari bagian ini adalah menunjukkan dengan latihan bagaimana memproses citra Sentinel 1 untuk menghasilkan informasi kelembapan tanah seutuhnya.

Persyaratannya adalah:

- Akun SEPAL
- Akses ke Google Earth Engine
- FileZilla
- Program GIS (seperti, ArcGIS, QGIS)

LANGKAH 1: BUKA SEPAL

1. Buka SEPAL dan masuk

Jika SEPAL belum terbuka, ketuk tautan berikut untuk membuka SEPAL di browser Anda: <https://sepal.io/>. Untuk instruksi *login* atau *sign-up* yang spesifik, lihat Lampiran 1, 'Masuk ke SEPAL'.

2. Hubungkan SEPAL dengan akun Google

Pastikan SEPAL telah terhubung dengan akun google Anda seperti yang dijelaskan pada Lampiran 1, '[Connecting to Google Earth Engine](#)'

3. Unggah *shapefile* dari area yang diinginkan atau *area of interest* (AOI) sebagai GEE asset

Instruksi untuk mengunggah *shapefile* sebagai sebuah asset dapat dibaca di sini: <https://developers.google.com/earth-engine/importing>

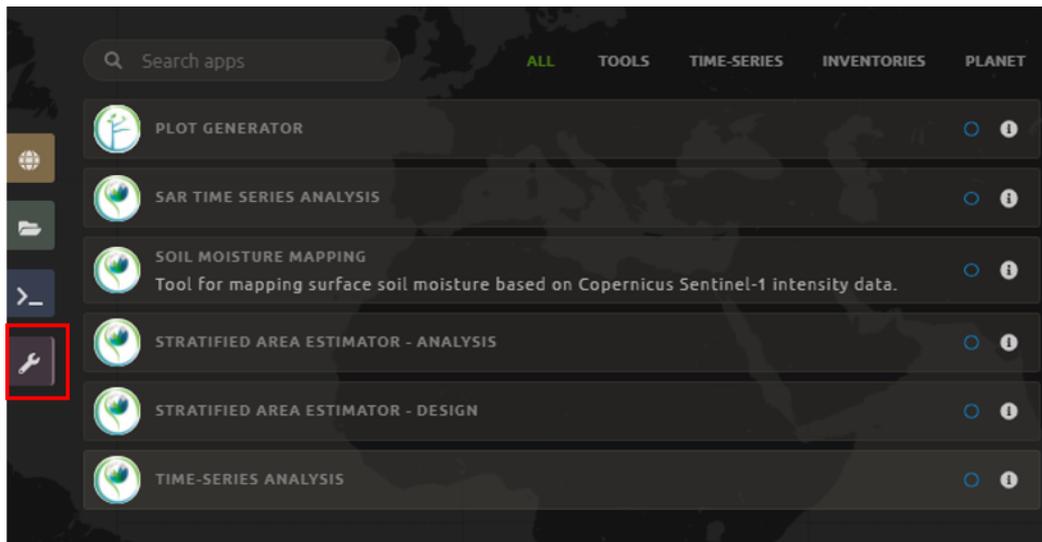
4. Nyalakan (*start*) contohnya *t1* pada terminal

Instruksi dapat ditemukan pada Lampiran 1 '[Using the terminal to start an instance](#)'

LANGKAH 2: PROSES DERET WAKTU DATA SENTINEL-1 UNTUK MENGHASILKAN PETA KELEMBAPAN TANAH

1. Buka (*open*) dan luncurkan (*launch*) modul *Soil Moisture Mapping*

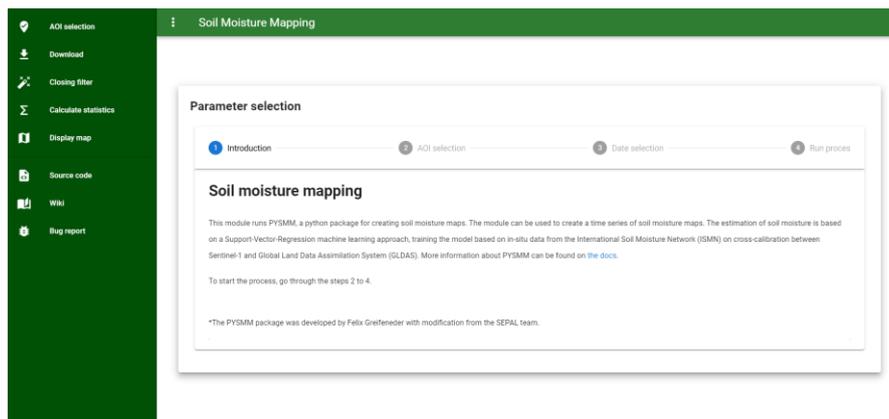
- Untuk mengakses modul, ketuk pada tab Apps  di SEPAL. Kemudian, gunakan kotak pencarian dan ketik "Soil Moisture Mapping" atau gunakan halaman paling bawah dan temukan secara manual (Gambar 3.1).



Gambar 3.1. Lokasi tab 'Apps' pada antarmuka SEPAL.

Sumber: <https://sepal.io/>, diakses 2020

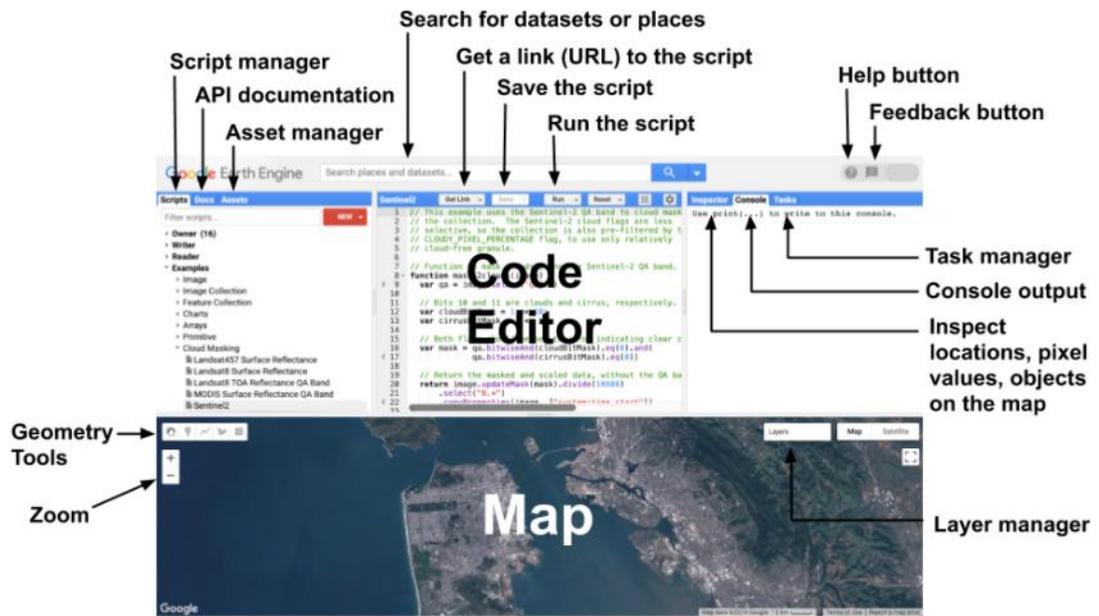
- Aplikasi ini akan diluncurkan dan ditampilkan pada tab baru di panel SEPAL (Gambar 3.2).



Gambar 3.2 Aplikasi *Soil Moisture Mapping* di SEPAL.

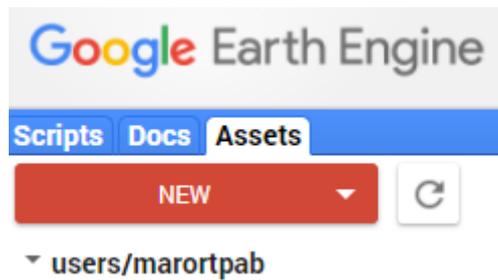
Sumber: <https://sepal.io/>, diakses pada 2020

- Modul ini memiliki 5 langkah utama yang dapat dipilih pada panel di sebelah kiri: *AOI selection*, *download*, *closing filter*, *calculate statistics*, dan *display map*.
- ketuk *AOI selection* dan ikuti empat sub-langkah berikutnya.
- Pada langkah *AOI selection*, pilih 'Use GEE asset', tempel *GEE Asset ID* Anda ke dalam kotak dan ketuk tombol "Use asset" untuk memilihnya sebagai AOI Anda. Untuk mengecek ID asset, kunjungi *GEE playground* dan ketuk tab ke tiga di sebelah kiri "Asset manager".



Gambar 3.3 Elemen antarmuka Google Earth Engine.

Sumber: Google Earth Engine⁶, diakses 2020

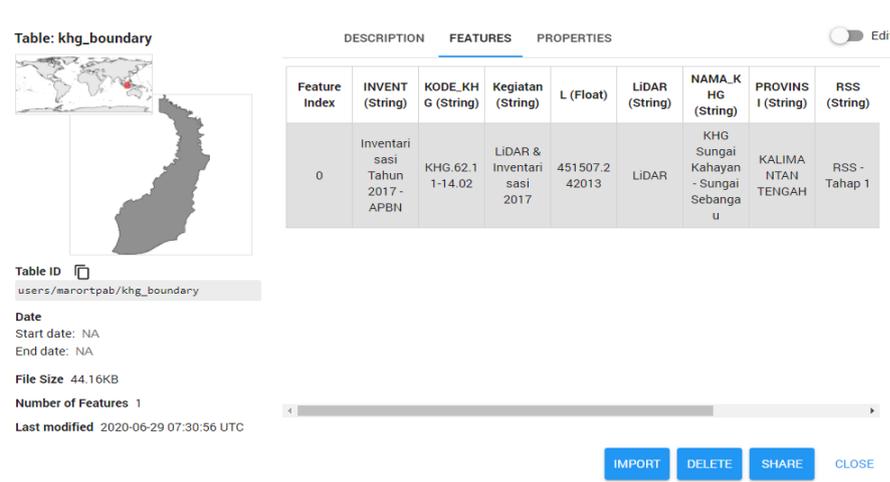


Gambar 3.4. Asset Google Earth Engine

Sumber: Google Earth Engine, diakses 2020

- Ketika Anda mengetuk pada Assets yaitu, sebuah shapefile, tampilan baru yang menunjukkan properti Assets akan terbuka.

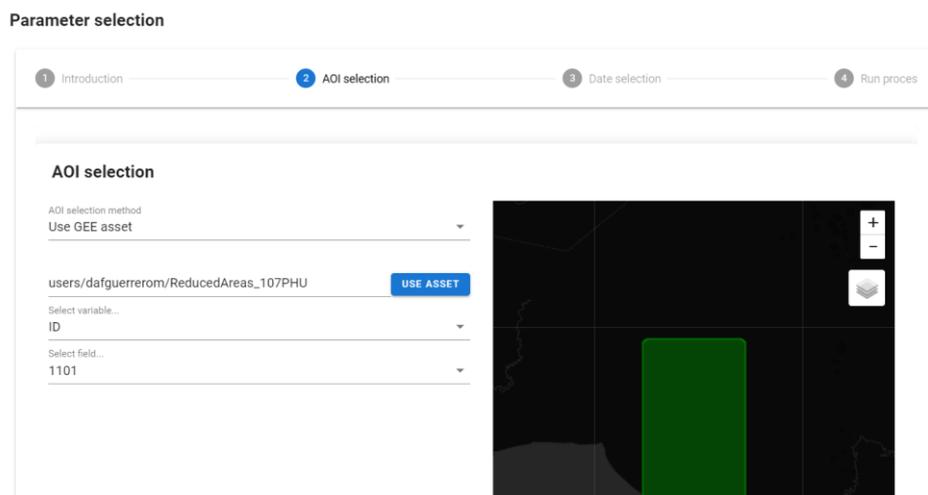
⁶ <https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground>



Gambar 3.5 Properti *assets* yang telah diunggah ke Google Earth Engine

Sumber: Google Earth Engine, diakses 2020

- Salin “Table ID” secara manual atau ketuk dua kali pada tombol , ID akan secara otomatis disalin ke clipboard.
- Akan muncul dua pilihan dropdown baru, pilih variabel, field Anda, dan tunggu hingga polygon telah dimuat di peta.



Gambar 3.6. Pemilihan *area of interest* (AOI)

Sumber: SEPAL

2. Pemilihan fitur dan rentang waktu

Langkah berikutnya dalam proses ini adalah memilih rentang waktu dari data yang ingin Anda proses melalui GEE, ada tiga opsi:

- **Single date:** akan memproses satu kelembapan tanah yang paling dekat dengan tanggal yang dipilih;
- **Range:** akan memproses semua data Sentinel-1 untuk membuat serangkaian deret waktu peta kelembapan tanah untuk rentang waktu yang dipilih; dan
- **All-time series:** akan memproses seluruh data Sentinel-1 yang tersedia, sejak peluncuran satelit pada tahun 2015, untuk membuat serangkaian deret waktu peta kelembapan tanah.

Specify the selection date method

Range

Start date 07/01/2020

End date 10/18/2020

Start date mm/dd/yyyy

End date mm/dd/yyyy

Gambar 3.7. Pemilihan fitur dan rentang waktu, serta format data untuk diproses di *Google Earth Engine*

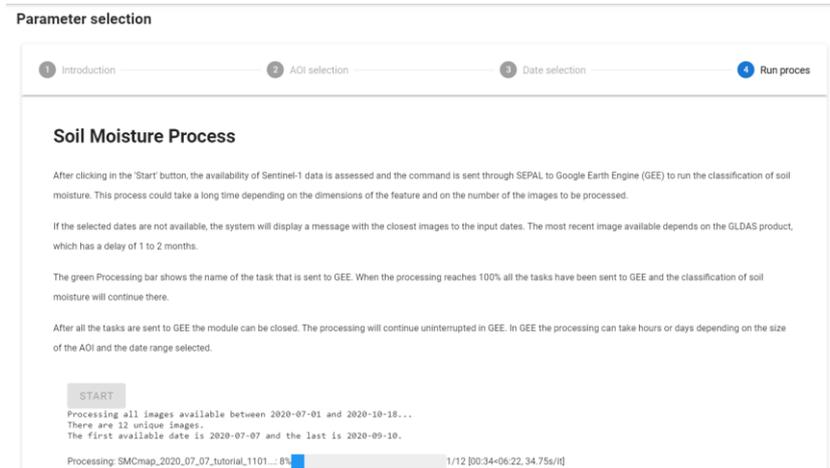
Sumber: SEPAL

Mohon perhatikan format tanggal, ini ditulis dengan urutan bulan/hari/tahun, contoh, 20 Juni 2020, akan ditulis 06/20/2020.

3. Memulai pemrosesan kelembapan tanah

- Setelah memilih filter, kunjungi tab “Run Process”.
- Ketika tombol “Start” sudah diketuk, akan dilakukan penilaian terhadap data Sentinel-1 yang tersedia, dan perintah dikirimkan ke *Earth Engine* untuk menjalankan klasifikasi kelembapan tanah.
- Proses ini dapat memakan waktu lam (berjam-jam hingga beberapa hari) tergantung dari dimensi fitur dan jumlah citra yang perlu diproses.
- Jika tanggal yang dipilih tidak tersedia, sistem akan menampilkan sebuah pesan dengan citra yang paling dekat dengan tanggal yang di-input.
- Citra yang paling terbaru yang tersedia bergantung pada [produk GLDAS](#), yang memiliki keterlambatan satu hingga dua bulan.
- *Processing bar* berwarna hijau menunjukkan nama dari tugas yang dikirimkan ke GEE.

- Ketika pemrosesan telah mencapai 100 persen seluruh tugas telah dikirimkan ke GEE dan klasifikasi kelembapan tanah akan terus dilanjutkan di sana.
- Setelah seluruh tugas telah dikirimkan ke GEE, modul bisa ditutup. Pemrosesan akan berlanjut di GEE tanpa diinterupsi. Di GEE, pemrosesan dapat berlangsung berjam-jam atau sehari-hari tergantung pada ukuran AOI dan rentang tanggal yang dipilih.

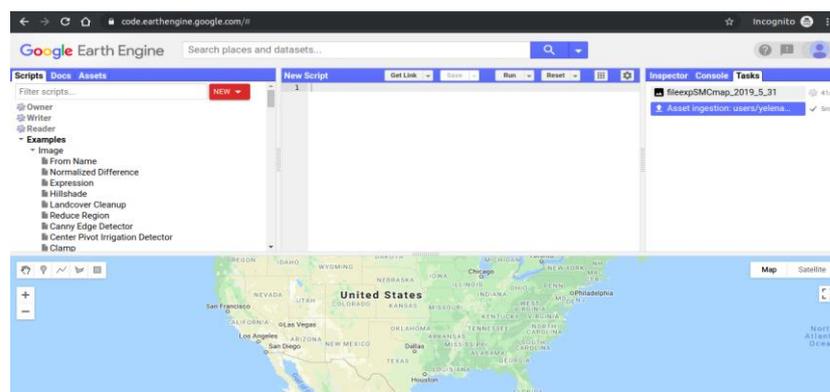


Gambar 3.8. Pemrosesan kelembapan Tanah.

Sumber: SEPAL

4. Mengecek kemajuan pemrosesan kelembapan tanah GEE

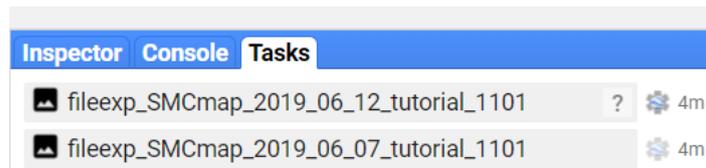
- Satu cara untuk mengecek status masing-masing tugas adalah dengan berkunjung ke [GEE code editor](#).



Gambar 3.9 Status dari tugas di Google Earth Engine code editor

Sumber: Google Earth Engine

- Ketuk pada tab 'Tasks' pada bagian di sebelah kanan. Anda akan melihat proses yang tengah berjalan ditunjukkan dengan gir yang berputar.



Gambar 3.10 Lokasi bar ‘Tasks’ pada *Google Earth Engine*

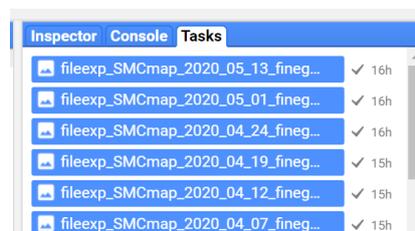
Sumber: Google Earth Engine

- Ketika unduhan telah selesai Anda akan melihat tanda centang biru. Cek secara berkala unduhan Anda untuk memastikan semua tanggal yang disebutkan telah diunduh.

LANGKAH 3: UNDUH PETA KELEMBAPAN TANAH DARI GEE KE SEPAL

1. Cek apakah pemrosesan telah selesai dilakukan di GEE

- Cek status masing-masing tugas di [GEE code editor](#). Ketuk tab ‘Tasks’ pada bagian di sebelah kanan. Anda akan melihat tanda centang biru di samping semua tugas.
- Peta kelembapan tanah untuk masing-masing tanggal telah diunduh ke Google Drive Anda. Langkah berikutnya akan secara otomatis memindahkan citra tersebut dari akun Google Anda ke akun SEPAL Anda.



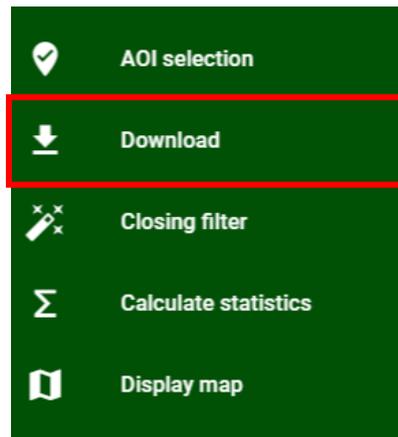
Gambar 3.11. *Tasks* yang telah diselesaikan di *Google Earth Engine code editor*

Sumber: Google Earth Engine

- Anda bisa mulai mengunduh citra ketika pemrosesan tengah dilakukan di GEE, tapi kami merekomendasikan untuk menunggu hingga semua bagian citra telah diproses di GEE.

2. Gunakan langkah Unduh (*download*)

- *Log-in* ke SEPAL dan mulai *App SMM* seperti sebelumnya.
- Di panel sebelah kiri, ketuk tombol ‘*Download*’.



Gambar 3.12: Gunakan langkah *download* di SEPAL

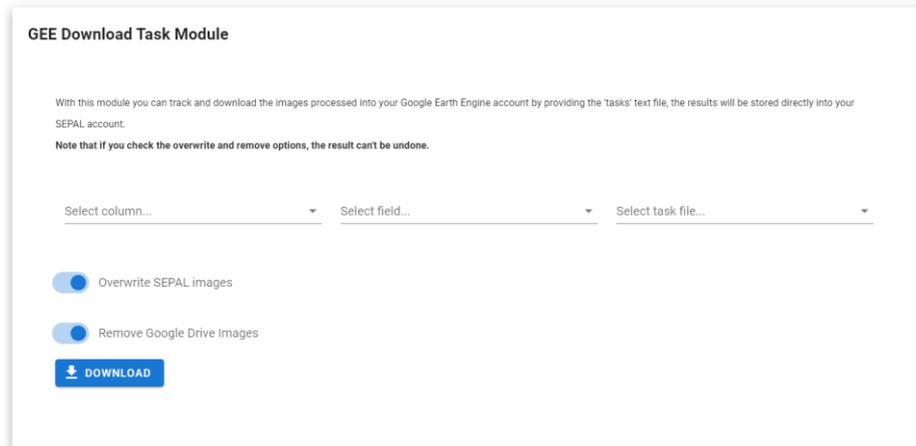
Sumber: SEPAL

3. Pilih *download task file*

- Struktur file untuk mengunduh dan mengelola data kelembapan tanah mengikuti struktur ini:

home/username/pysmm_downloads/0_raw/asset_name/row_name

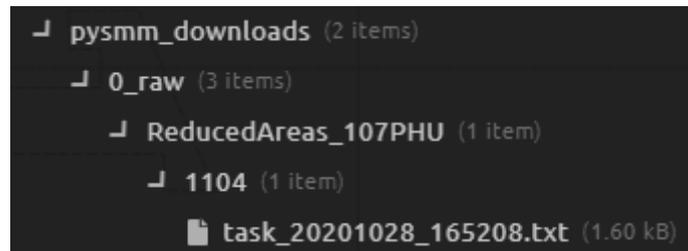
- i. Seluruh unduhan selalu dapat ditemukan di folder *pysmm_downloads*. Folder *pysmm_downloads* dapat ditemukan dengan cara mengetuk ikon folder pada layar utama SEPAL. Kemudian, seperti pada jendela penjelajah lainnya Anda dapat menjelajahi folder yang diinginkan.
- ii. Setiap kali asset yang berbeda digunakan untuk memperoleh kelembapan tanah, maka akan dibuat satu folder asset baru.
- iii. Untuk setiap polygon yang digunakan dari asset, dipilih dengan menentukan nama bidang kolom dan baris, satu folder unik dengan nama bidang baris akan berisi *file task download*.



Gambar 3.13: Modul *download task* di Google Earth Engine

Sumber: Google Earth Engine

- File *task download* dapat ditemukan di folder `home/user/pysmm_downloads/0_raw/assetname/rowname/`
- Ketentuan penamaan file *task download* adalah: `task_datedownloadinitiated_code.txt`



Gambar 3.14: Ketentuan nama file *task download*

Sumber: SEPAL

- Gunakan tiga daftar dropdown untuk memilih file *text task* yang diinginkan dengan mengetuk nama folder.
- Terdapat juga opsi untuk menimpa duplikat yang sudah diunduh ke dalam SEPAL dan untuk menghapus citra yang sudah diunduh dari Google Drive. Ketika citra sudah dihapus dari Google Drive, *file task download* tidak akan berfungsi lagi karena citra tersebut tidak akan disimpan di Google Drive.
 - Menimpa citra SEPAL:** Dalam kasus dimana sebelumnya Anda telah mengunduh satu citra di path folder yang sama, modul akan menimpa citra yang memiliki nama yang sama.
 - Menghapus citra Google Drive:** Tandai opsi ini jika Anda ingin mengunduh citra ke akun SEPAL Anda dan hapus file dari akun Google Drive Anda.

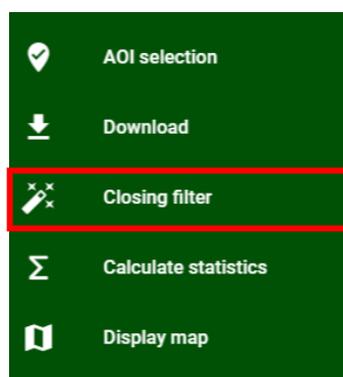
- Ketuk tombol *Download* untuk mengunduh peta kelembapan tanah dari akun Google Drive Anda ke SEPAL.
- Citra akan diunduh satu per satu, biarkan aplikasi terbuka pada saat pengunduhan berjalan.
- Setelah data selesai diunduh Anda dapat menggunakan perangkat yang tersedia di SEPAL untuk memproses dan menganalisa peta kelembapan tanah.

LANGKAH 4: PASCA-PROSES DAN ANALISA DATA DERET WAKTU KELEMBAPAN TANAH

Setelah unduhan selesai, kita bisa menerapkan suatu metodologi yang kuat untuk memfilter citra guna mengisi celah ketiadaan data (no-data) dan menilai pola pada deret waktu peta kelembapan tanah. Ini akan membutuhkan sumber daya SEPAL yang lebih kuat. Anda harus menyalakan komputer *cloud* yang berdaya kuat dari antarmuka SEPAL.

1. Pilih langkah *Closing filter*

- Matikan komputer *cloud* SEPAL yang masih berjalan. Untuk instruksi, lihat lampiran 1 bagian ‘Shut down and existing instance’.
- Kemudian nyalakan komputer *cloud* SEPAL yang baru yang mampu menjalankan pasca-pemrosesan yang intensif. Lihat Lampiran 1 bagian ‘Using the terminal to start and instance’ dan ‘What kind of instance do I need’. Lihat juga Lampiran 1 bagian ‘Keeping an instance alive’.
- Saat instance yang baru dan yang berdaya kuat telah dimulai, nyalakan *App* SMM seperti sebelumnya. Sekarang *App* SMM akan beroperasi di komputer *cloud* dengan daya yang lebih kuat.
- Di panel sebelah kiri pilih tab “*Closing filter*”.

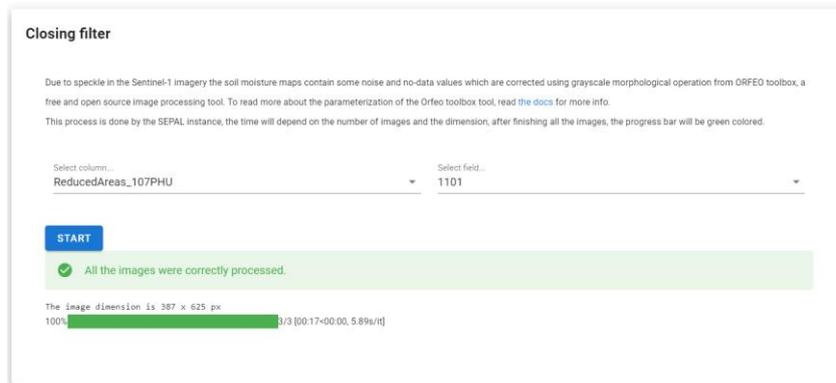


Gambar 3.15. Menutup tab filter di SEPAL

Sumber: SEPAL

2. Jalankan bagian pasca-pemrosesan pada modul

- Jelajahi folder tempat citra disimpan. Modul ini akan memproses sebuah folder yang berisikan banyak citra, lihat satu persatu citra yang ada. Karena itu, input haruslah folder dimana data mentah citra disimpan. Modul ini secara otomatis akan menampilkan dua menu pilihan, pilihlah opsi yang diinginkan.



Gambar 3.16. Menutup filter *processing*

Sumber: SEPAL

Citra radar mentah disimpan di folder yang sama dengan lokasi tempat penyimpanan file *task download*.

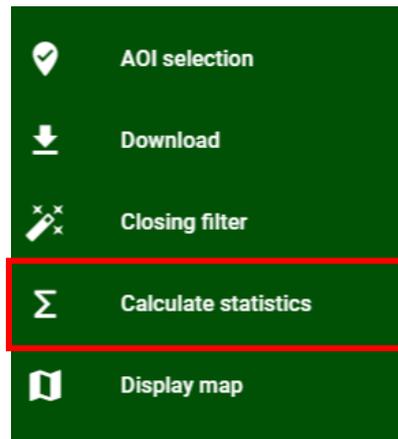
- Ketuk tombol ‘Start’ untuk menjalankan algoritma *data-filling* untuk setiap peta kelembapan tanah.

Karena adanya speckle pada citra radar Sentinel-1, peta kelembapan tanah mengandung beberapa gangguan (*noise*) dan nilai tanpa-data (*no-data values*) yang dikoreksi – sampai batas tertentu – dengan menggunakan operasi morfologi skala abu-abu dari *Orfeo toolbox*; sebuah alat pemrosesan citra radar yang bebas biaya dan perangkat lunak sumber terbuka. Untuk membaca lebih lanjut mengenai parameterisasi perangkat *Orfeo toolbox*, kunjungi: https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app_GrayScaleMorphologicalOperation.html.

Proses ini dilakukan oleh *SEPAL instance* yang waktunya akan bergantung pada jumlah citra radar dan dimensi, setelah menyelesaikan seluruh citra radar, *progress bar* akan berwarna hijau.

3. Jalankan *Statistics postprocess*

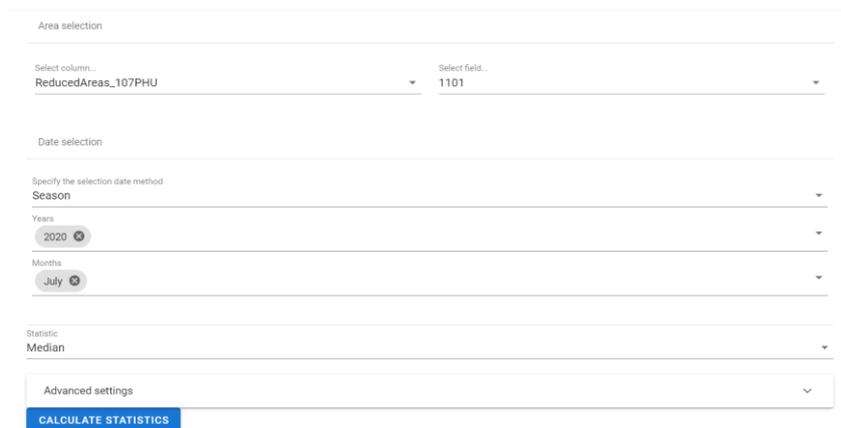
- Pada panel di sebelah kiri pilih tab “Calculate statistics”.



Gambar 3.17. Tab statistics postprocess di SEPAL

Sumber: SEPAL

- Setelah data telah difilter, akan dilakukan analisa deret waktu peta kelembapan tanah. Beberapa statistik dapat diterapkan baik untuk keseluruhan deret waktu maupun rentang waktu tertentu, statistik seperti *median*, *mean*, *standard deviation*, atau pola linear (gradien regresi linear) tersedia untuk memproses data terpilih.
- Modul ini menggunakan [Stack Composed python module](#), yakni sebuah modul yang menghitung statistik tertentu untuk semua nilai piksel yang valid dalam serangkaian deret waktu dengan menggunakan sebuah proses paralel.
- Pilih kolom dan field untuk memproses seluruh citra di dalam folder.

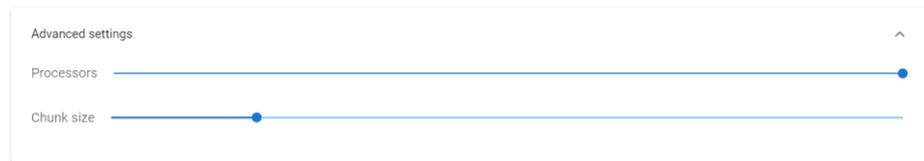


Gambar 3.18. Analisa deret waktu peta kelembapan tanah

Sumber: SEPAL

- Ada tiga opsi untuk menganalisa data untuk kerangka waktu yang berbeda.

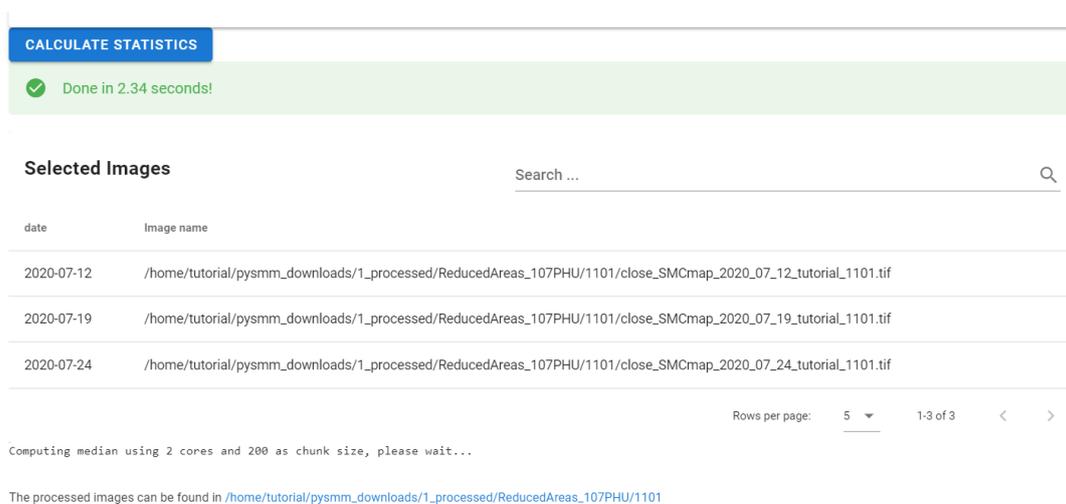
- i. **All-time series:** menjalankan analisa untuk semua citra yang ada di folder
 - ii. **Range:** menjalankan analisa untuk seluruh citra dalam rentang waktu yang dipilih
 - iii. **Season:** pengguna dapat mendefinisikan satu musim dengan memilih bulan-bulannya. Analisa dijalankan hanya untuk bulan-bulan yang dipilih dalam tahun-tahun terpilih. Contohnya, jika Januari, Februari, dan 2016, 2017, 2018 telah dipilih, maka analisa akan dijalankan untuk Januari 2016, Januari 2017, Januari 2018, Februari 2016, Februari 2017, dan Februari 2018.
Anda juga dapat memilih hanya satu tahun atau bulan, karena itu ia akan memproses seluruh tahun/bulan yang dipilih.
- Ada berbagai opsi statistik yang dapat dihitung. Opsinya adalah:
 - Median (nilai tengah)
 - Mean (rata-rata)
 - Gmean, geometric mean (rata-rata geometric)
 - Max (nilai maksimum)
 - Min (nilai minimum)
 - Std, standard deviation (simpangan baku)
 - Valid pixels (piksel yang valid)
 - Linear trend (pola linear)
 - Opsi '*Valid pixels*' akan menciptakan satu citra baru yang hanya mewakili hitungan piksel-piksel yang valid dari tumpukan (stack).
 - *Median, Mean, Geometric Mean, Max, Min, Standard Deviation* dan *Valid pixels*, adalah statistik yang tidak memerlukan banyak persyaratan komputasi, sehingga waktu untuk melakukan tugas-tugas itu relatif cepat, bergantung pada kondisi citra tersebut.
 - Tujuan penggunaan pengaturan lanjutan adalah untuk memperbaiki waktu dan mengelola sumber daya sistem. Umumnya, hal ini dapat dioptimalkan secara otomatis tapi juga dapat dimodifikasi oleh pengguna. Pengaturan ini mengendalikan jumlah prosesor yang dipergunakan untuk pemrosesan secara paralel, sehingga Anda dapat mengoptimalkan waktu untuk memproses citra yang sangat besar dengan menggunakan beberapa prosesor dalam waktu yang bersamaan. Secara otomatis, seluruh prosesor yang tersedia akan digunakan. Perlu diingat bahwa semakin banyak CPU yang tersedia di *instance* yang Anda pilih di terminal, maka semakin cepat pemrosesannya.



Gambar 3.19. Pengguna dapat memodifikasi pengaturan lanjutan pada proses.

Sumber: SEPAL

- **Processor:** secara baku, modul ini akan menampilkan jumlah prosesor yang aktif pada sesi *instance* yang sedang berjalan dan akan melakukan *stack-composed* menggunakan semuanya, namun demikian, untuk mengetes patokan (*benchmark*) yang terbaik untuk tugas yang spesifik, jumlah ini dapat diubah di tab pengaturan lanjutan.
 - **Chunks:** angka pada *chunk* menunjukkan bentuk *array* yang akan diproses secara paralel pada prosesor yang berbeda. Dengan kata lain, jika 200 adalah angka *chunk* yang ditentukan, maka modul *stack-composed* akan membagi input citra ke dalam beberapa potongan persegi kecil sebanyak 200 pixels dengan bentuknya, untuk informasi mengenai bagaimana memilih bentuk *chunk* yang terbaik, ikuti [dask documentation](#).
- Setelah pengaturan ditentukan, ketuk tombol ‘Calculate statistics’.
 - Setelah memilih waktu temporal untuk menjalankan analisa dan parameter untuk menghitung, citra yang diproses akan tersusun dalam daftar, bersama dengan tanggal pencitraan.



Gambar 3.20. Daftar citra yang diproses beserta tanggal.

Sumber: SEPAL

- Citra yang diproses dapat ditemukan pada folder:

home/user/pysmm_downloads/1_processed/assetname/rowname/stats

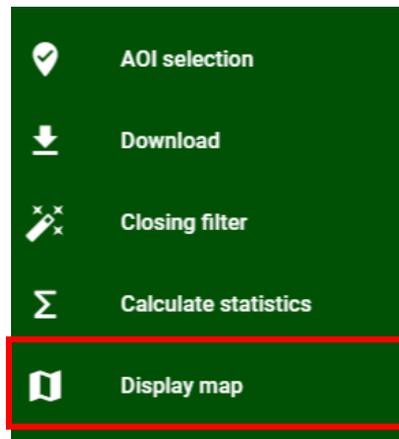


Gambar 3.21. Folder tempat penyimpanan citra yang telah diproses

Sumber: SEPAL

LANGKAH 5: VISUALISASI CITRA

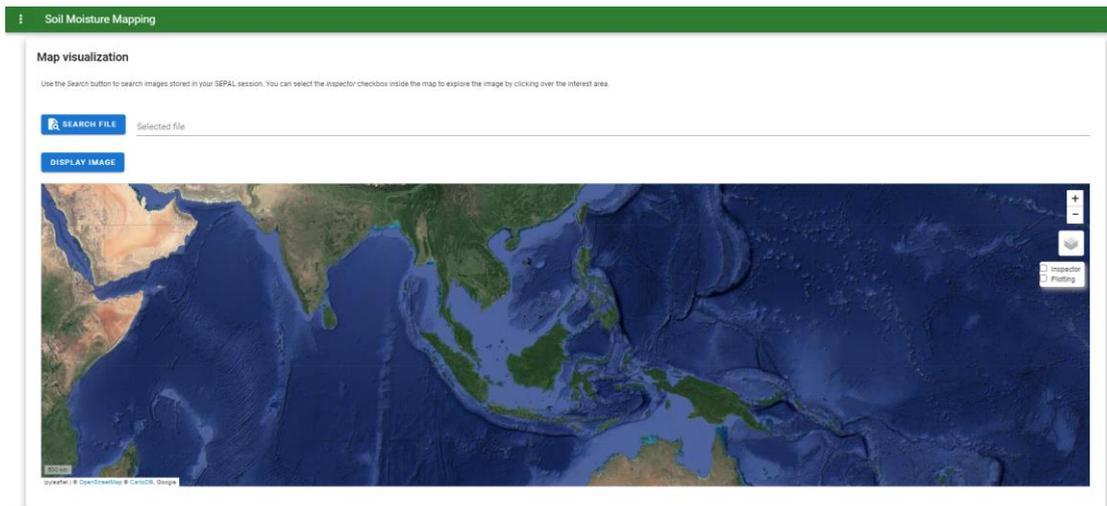
1. Pada panel sebelah kiri pilih tab “Display map”.



Gambar 3.22. Tab ‘Display map’ di SEPAL

Sumber: SEPAL

2. Tab *map visualization* memungkinkan Anda untuk menampilkan citra monoband apapun ke akun SEPAL Anda, tidak hanya data yang telah diunduh.



Gambar 3.23. Tab ‘Map visualization’ di SEPAL

Sumber: SEPAL

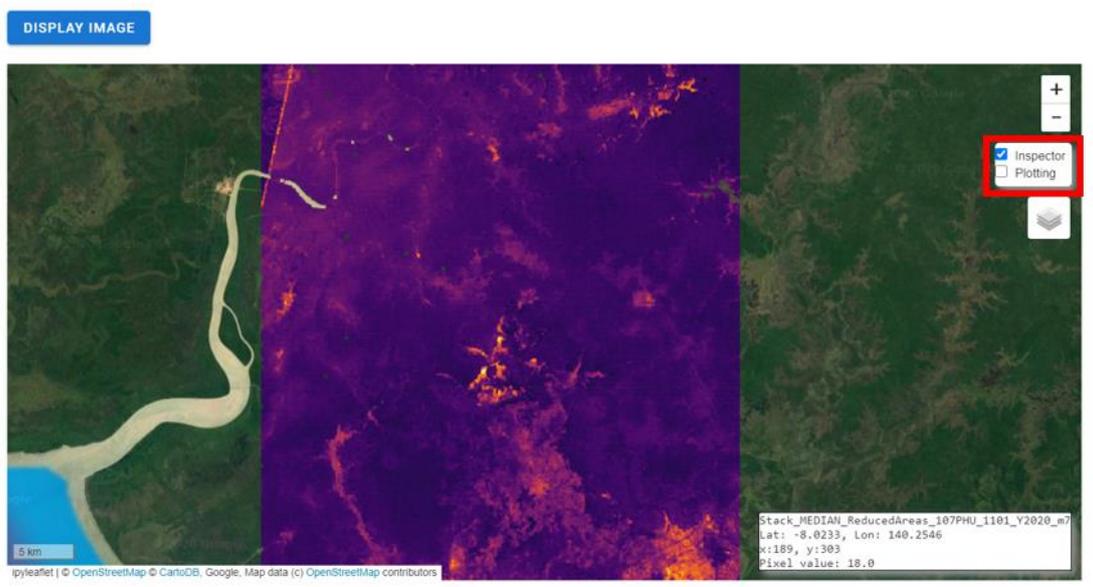
3. Ketuk tombol “Search file” dan jelajahi daftar dropdown, cari citra yang diinginkan, dan ketuk tombol “Display image”.



Gambar 3.24. Fungsi ‘Search image’ di SEPAL

Sumber: SEPAL

4. Tunggu sampai citra telah diubah di peta dan jelajahi luaran umumnya.



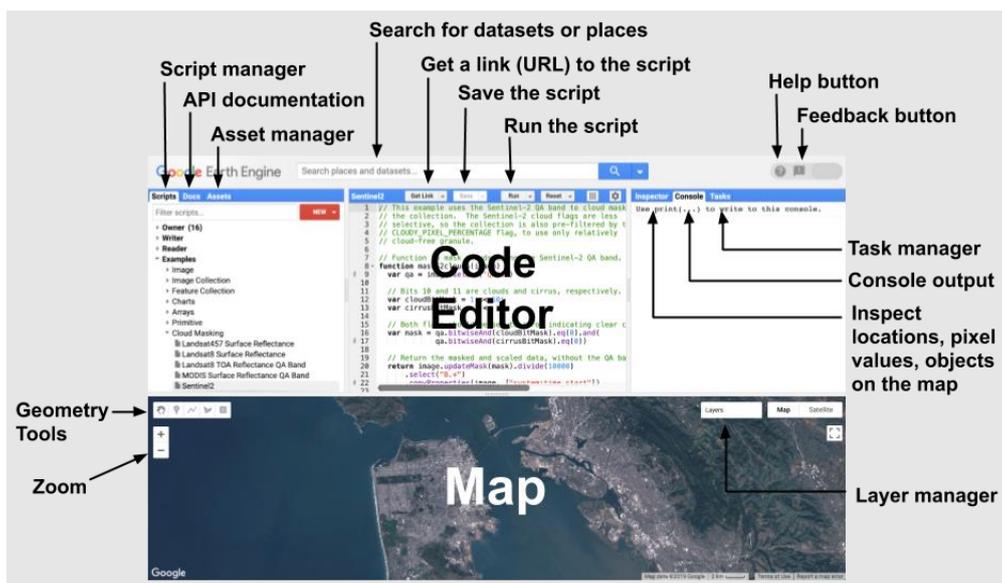
Gambar 3.25. Luaran visualisasi di SEPAL

Sumber: SEPAL

- Beri centang pada kotak “Inspector” dan ketuk pada koordinat apapun di dalam citra untuk menjelajahi nilai piksel, Anda akan melihat kotak luaran (*output box*) di sudut kanan bawah beserta data.

Saat menunggu peta kelembapan tanah diunduh mari kita periksa ketersediaan citra Sentinel 1 untuk area Indonesia. Ketuk tautan berikut ini untuk melihat jumlah akuisisi dari Sentinel 1 secara global:

<https://code.earthengine.google.com/6c919eaa51cb77507e373af8eca3fbc7>



Gambar 3.26. Komponen Google Earth Engine

Sumber: Google Earth Engine

6. Untuk informasi lebih lanjut mengenai penggunaan *Google Earth Engine*, lihat:

<https://developers.google.com/earth-engine/playground>

Pertanyaan penuntun

1. *Pilih suatu area yang Anda kerjakan. Ada berapa banyak citra Sentinel-1 yang tersedia untuk area yang Anda inginkan?*
2. *Ada berapa banyak citra Sentinel-1 yang tersedia untuk satu lokasi di Jerman?*

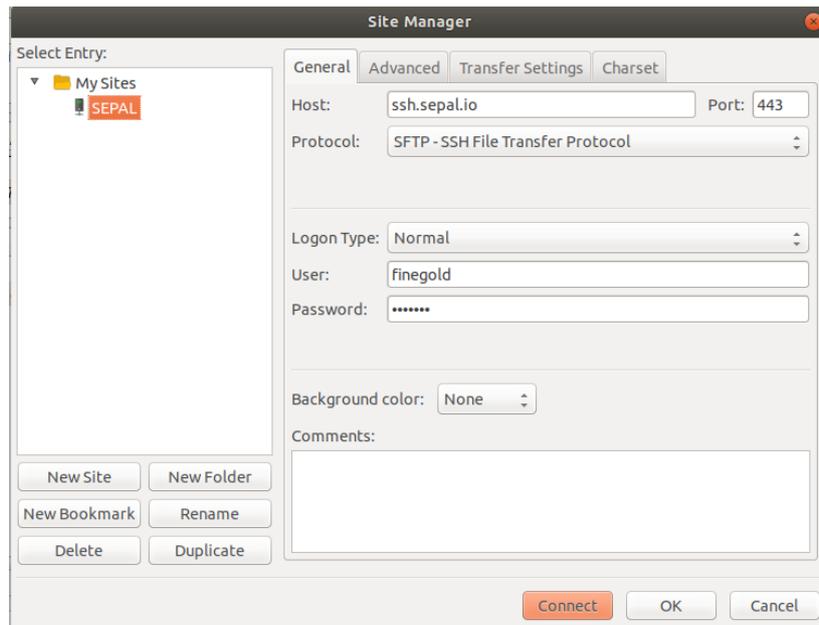
LANGKAH 6: UNDUH DAN UNGGAH DATA DARI ATAU KE SEPAL KE ATAU DARI KOMPUTER ANDA

1. Sambungkan FileZilla ke akun SEPAL Anda

- Unduh FileZilla dari [tautan ini](#).
- Dengan menggunakan FileZilla, file di SEPAL mudah diakses. Untuk menggunakan FileZilla, buka aplikasi dan sambungkan ke server SEPAL dengan memilih Menu File --> Site Manager pada tab menu.

2. Pada Pop-up di *site manager*, ketuk tombol 'New Site'. Gunakan cuplikan layar (screenshot) di bawah ini sebagai panduan untuk mengisi formulir:

- Host: ssh.sepal.io
- Port: 443
- Protocol: SFTP – SSH File Transfer Protocol
- Logon Type: Normal
- User: username SEPAL Anda
- Password: password SEPAL Anda



Gambar 3.27. Site manager Pop-up in FileZilla

Sumber: FileZilla

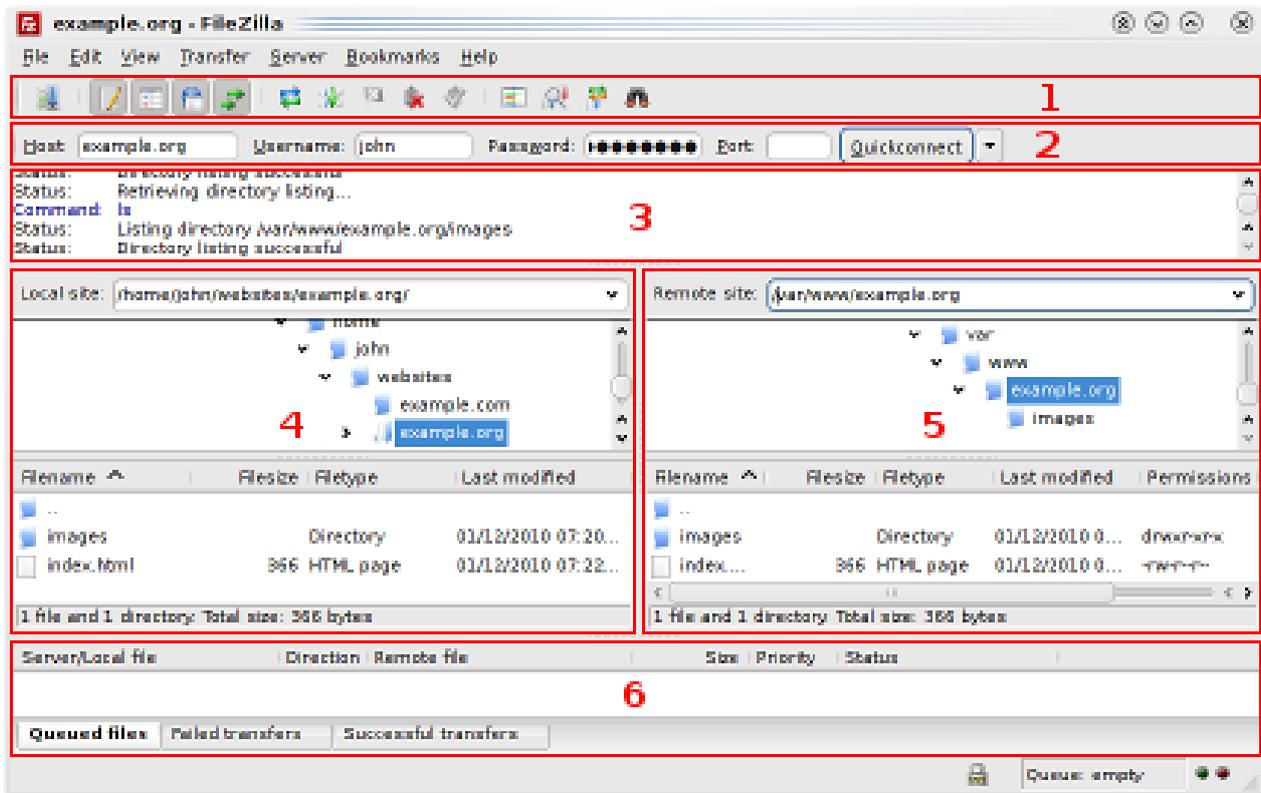
3. Ketuk *Connect* dan drive SEPAL Anda akan muncul di panel sebelah kanan, paralel dengan panel di sebelah kiri dan file di komputer Anda.

4. Menggunakan FileZilla

Berikut ini adalah pengantar singkat dari [FileZilla online tutorial](#) berkenaan dengan citra di bawah ini:

- *the toolbar* (1)
- *quick connect bar* (2),
- *The message log* (3) menampilkan pesan-pesan transfer dan koneksi terkait. Di bawah ini, Anda dapat menemukan daftar file.
- Kolom kiri (*local pane*, 4) menampilkan file lokal dan direktori, yaitu, folder-folder pada PC Anda. Pastikan Anda berlokasi di folder kanan, idealnya, Anda harus memiliki satu folder di komputer Anda, yang akan menyimpan seluruh data yang terkait dengan proses ini, ketuk pada folder tersebut.
- Kolom kanan (*server pane*, 5) menampilkan file dan direktori pada server yang tersambung dengan Anda. Kedua kolom ini memiliki pohon direktori di bagian atas dan daftar lengkap dari isi direktori yang baru-baru saja dipilih di bagian bawah. Anda bisa dengan mudah menjelajahi baik pohon dan daftar dengan mengetuk disekitarnya seperti pada file manager lainnya.

- Di bagian bawah window, *transfer queue* (6) memberikan daftar file yang akan ditransfer dan yang sudah ditransfer. Bagian ini sangat perlu diperiksa untuk mengetahui apakah file sudah berhasil ditransfer.

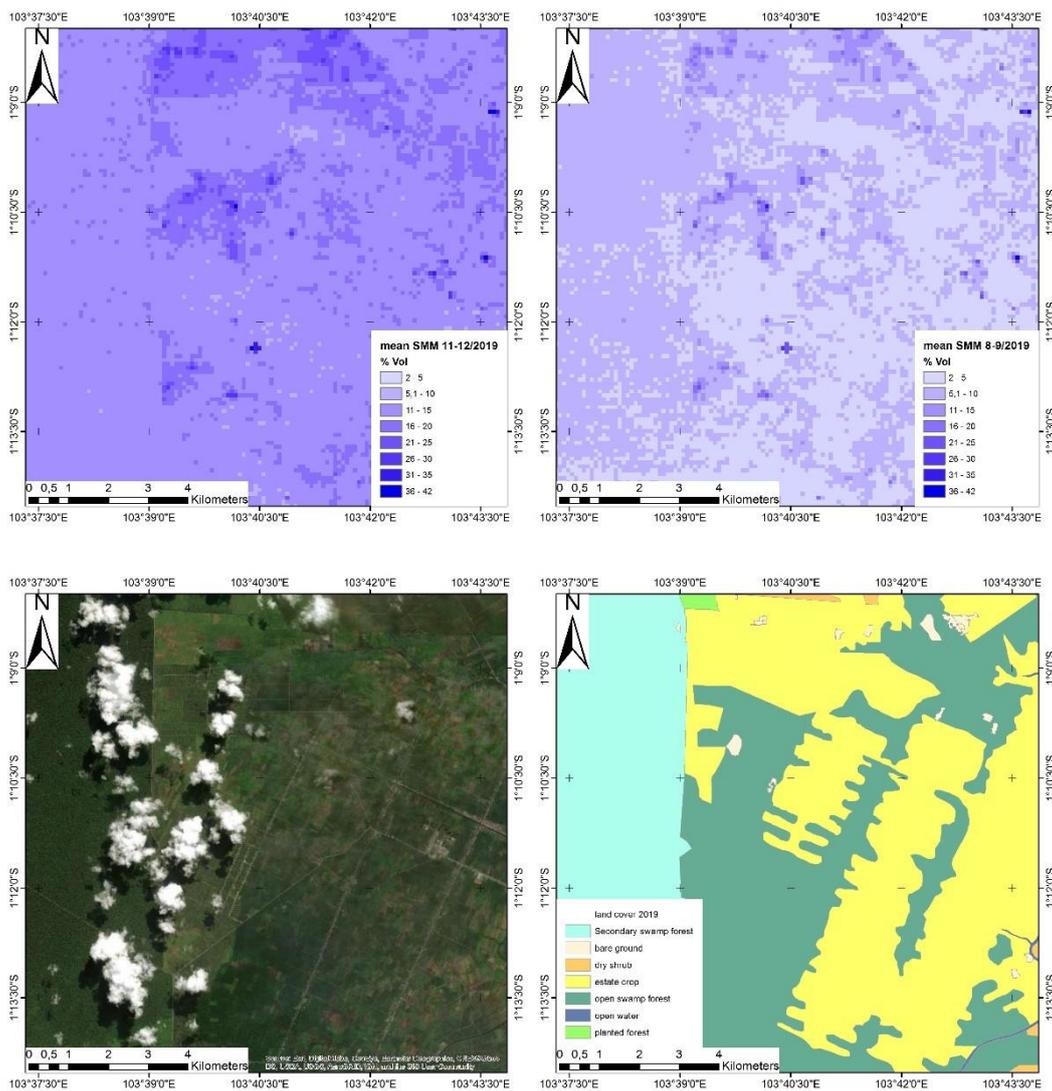


Gambar 3.28. Komponen utama FileZilla

Sumber: FileZilla

Bagian 4: Interpretasi hasil

Masing-masing peta mengandung nilai kelembapan tanah yang dinyatakan dengan persentase volume, dalam m^3 air / m^3 tanah, dengan menggunakan algoritma dan kalibrasi dari [Greifeneder dkk. \(2019\)](#). Nilainya dapat berkisar antara 0 hingga 100 persen, yang masing-masing menyatakan sangat kering dan sangat basah, secara berturut-turut. Nilai di atas 100 dapat diinterpretasikan sebagai area terendam, namun diperlukan analisa lanjutan ([Gambar 4.1](#)).



Gambar 4.1. Contoh produk rerata (*mean*) Soil Moisture Mapping (SMM) tahun 2019 suatu area dengan kegunaan lahan yang beragam. Musim kemarau dan hujan di lokasi tersebut adalah November–Desember (kiri atas) dan Agustus-September (kanan atas).

Sumber: Pablo Martin, FAO.

Produk-produk SMM masih perlu dikembangkan lebih jauh dan mengalami latihan-latihan kalibrasi dan validasi. Pada saat penulisan, bulan Desember 2020, model ini telah dikalibrasi dengan data lapangan global dari *International Soil Moisture Network* (ISMN), namun hanya memiliki beberapa stasiun pengukuran untuk seluruh kawasan Asia Tenggara. Sepanjang elaborasi proyek, ditemukan bahwa model estimasi mengikuti pola umum kelembapan tanah dari waktu ke waktu, ketika dibandingkan dengan data lapangan lokal. Oleh karena itu, pengambilan pola dan anomali bisa dilakukan berdasarkan produk SMM. Namun demikian, karena produk SMM dapat mengalami kesalahan sistematis, nilai absolutnya mungkin sangat berbeda dari pengukuran lapangan. Oleh karena itu, perlu dilakukan kalibrasi lokal untuk memperbaiki bias tersebut.

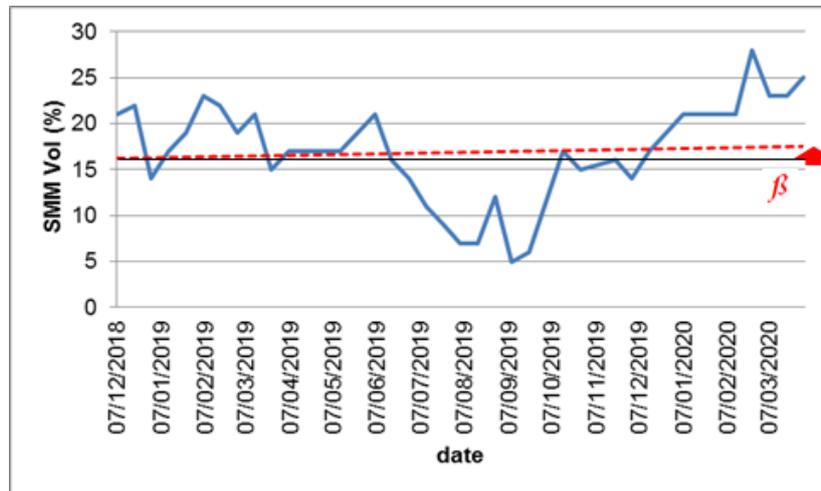
A. INTERPRETASI LEVEL PIKSEL

Produk-produk SMM tidak boleh diinterpretasikan pada tingkat piksel. Lahan gambut yang telah kering dan terdegradasi mengandung gambut yang sangat berpori dengan konduktivitas hidrolis yang tinggi, dengan kata lain air dengan mudah mengalir di dalam gambut dan menembus lapisan-lapisan dimana informasi penginderaan jauh dapat terdeteksi. Piksel yang menunjukkan nilai SMM yang tinggi mungkin berdekatan dengan lainnya yang memiliki topografi yang agak tinggi, dan karenanya terlihat lebih kering di permukaan, meskipun air yang bergerak di bawahnya jumlahnya tetap sama. Variabel serupa lainnya juga dapat mempengaruhi hasil SMM, misalnya perbedaan tutupan lahan seperti perbedaan antara lahan hutan dan non-hutan. Data lapangan lanjutan dapat membantu memverifikasi karakteristik ekosistem lahan gambut, tempat di mana SMM bekerja paling baik, dan tempat di mana tidak direkomendasikan untuk digunakan. Namun demikian, FAO telah menetapkan area-area di mana model ini, dalam kondisinya saat ini, telah terbukti sesuai dengan kondisi di lapangan. Ada cara alternatif lain untuk memantau GWL, termasuk dengan menggunakan LiDAR untuk mendeteksi kedalaman air kanal, tapi untuk saat ini biaya dan kerumitannya melebihi dari perangkat FAO yang telah dijelaskan dalam manual ini.

B. ANALISA STATISTIK

Modul pemetaan kelembapan tanah di SEPAL menghasilkan beberapa analisa statistik, nilai gradien dari pola linear, nilai tengah, rata-rata, nilai maksimum, nilai minimum, dan simpangan baku dalam periode yang didefinisikan oleh pengguna. Dengan hanya melakukan interpretasi kuantitatif langsung terhadap produk SMM tidak dapat dianggap sebagai penggunaan data yang tepat. Contohnya, pemantauan restorasi gambut dengan menggunakan produk pola linear, yang menghitung gradien regresi linear positif atau negatif antara SMM dan waktu, memerlukan beberapa pengetahuan mengenai musim di area yang dianalisis agar dapat menginterpretasikan variasi dari produk tersebut. Ini karena pola linear sangat bergantung pada tanggal mulai dan tanggal akhir yang dipilih dalam analisa. Produk pola linear menjelaskan perubahan positif atau negatif pada kelembapan tanah sepanjang waktu pada tingkat piksel. Secara umum,

perubahan positif artinya SMM terbaru yang telah dipilih memiliki nilai yang lebih tinggi daripada SMM yang lama, dan perubahan negatif jika SMM terbaru memiliki nilai lebih rendah daripada yang sebelumnya. Dengan demikian, nilai dari satu piksel tunggal dapat mewakili pola setelah dilakukan pemilihan citra dari tanggal yang berbeda. Menghitung regresi linear antara tanggal dan kelembapan tanah akan menghasilkan plot seperti dalam [Gambar 4.2](#).



Gambar 4.2. Pola linear yang dikalkulasi pada satu periode menggunakan seluruh data SMM yang tersedia pada suatu lokasi.

Sumber: Pablo Martin, FAO.

Regresi linear yang paling sederhana antara waktu dan kelembapan tanah dapat ditulis seperti berikut:

$$y = \alpha + \beta x$$

Di mana:

y = kelembapan tanah

α = nilai intersep dari persamaan

β = gradien regresi linear (kemiringan garis)

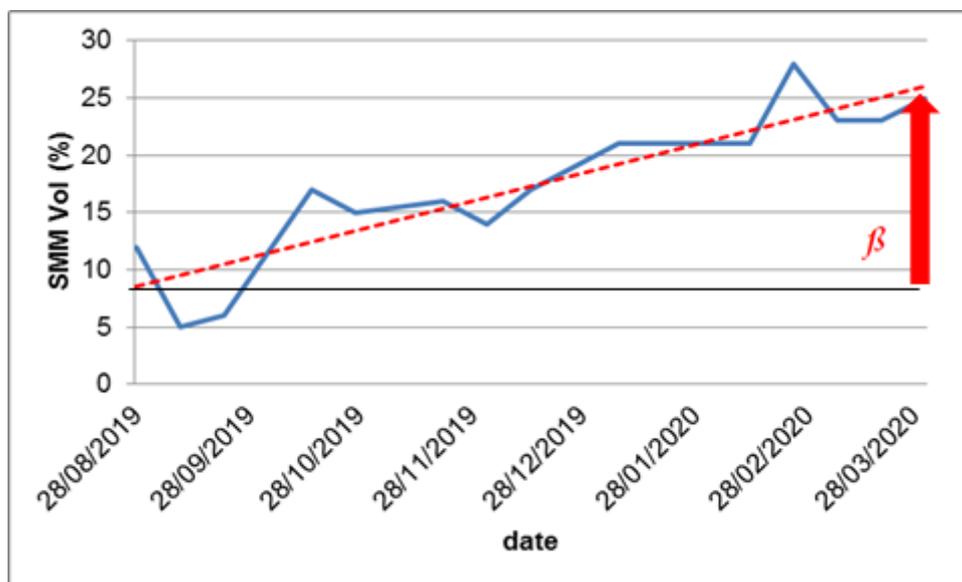
x = tanggal citra⁷

Pada Gambar 4.2, β mewakili gradien linear yang mendekati pola (positif atau negatif) kelembapan tanah pada rentang tanggal yang dipilih. β adalah sudut antara garis horisontal (hitam) dan pola linear (garis putus merah). Dalam kasus ini, β bernilai positif karena sudutnya di atas 0, tapi sangat rendah. Nilai β pada

⁷ Unit ini secara default dinyatakan dalam milidetik sejak 1970-01-01 T00:00:00Z. Ini adalah cara konvensional untuk melabel tanggal dan waktu dalam citra satelit. Karena unit ini memiliki nilai yang besar, yaitu, 2020/10/30 (YYYY/MM/DD), 12:00:00 (HH:MM:SS) setara dengan 1604055600000 milidetik, nilai output dari produk tren linear biasanya juga lebih besar (<https://currentmillis.com/>)

rentang waktu akhir memiliki nilai yang lebih tinggi dari dibandingkan pada rentang waktu awal, tetapi memiliki variasi yang banyak diantaranya karena periode hujan dan kemarau, tingkat dekomposisi gambut, dan asal air, yang mungkin dapat meningkatkan variabilitas nilai kelembapan tanah.

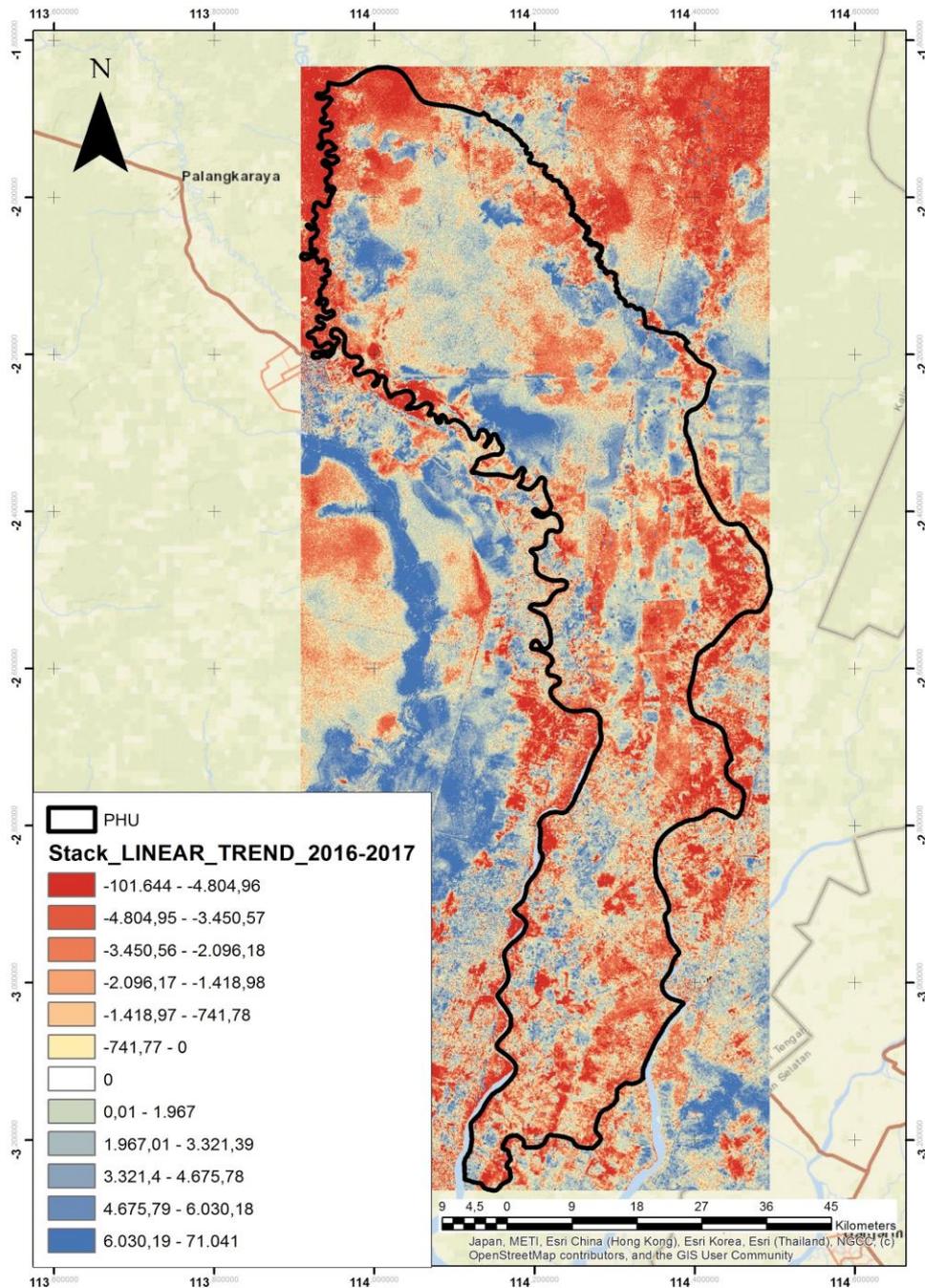
Meskipun demikian, pada [Gambar 4.3](#), bisa dilihat ada pola yang lebih kuat, β juga positif, tetapi dengan nilai yang lebih tinggi dari sebelumnya. Kelembapan tanah di awal rentang tanggal yang dipilih adalah lebih rendah (ini adalah periode kemarau pada lokasi ini) dibandingkan dengan di akhir (awal dari periode hujan). Analisisnya pada lokasi yang sama, menunjukkan satu contoh yang jelas tentang bagaimana pentingnya memilih tanggal yang tepat untuk menghasilkan produk ini, dan memiliki pengetahuan dasar tentang musim di area yang tengah diselidiki.



Gambar 4.3. Pola linear yang dikalkulasi dari data dengan periode yang lebih pendek dibandingkan dengan data yang dipilih di [Gambar 4.2](#) menggunakan data SMM dengan ketersediaan data rendah pada lokasi yang sama.

Sumber: Pablo Martin, FAO.

Nilai pixel yang ditunjukkan dalam pola linear dari citra dengan nilai kemiringan (β) dari persamaan ([Gambar 4.4](#)). Produk pola linear dapat langsung dipergunakan untuk menginterpretasi beberapa batasan (lihat bagian berikut: [‘D. Keterbatasan dalam menginterpretasikan kelembapan tanah di lanskap lahan gambut’](#)), namun karena nilai yang ditampilkan besar, produk dapat diubah skalanya dengan menggunakan ArcGIS, QGIS atau perangkat lunak geospasial lainnya. Rekomendasinya adalah untuk mengubah skala produk di dalam interval (-1,1).



Gambar 4.4. Citra pola linear sebagai hasil penggunaan seluruh citra SMM yang tersedia pada tahun 2016–2017 pada kesatuan hidrologis gambut “KHG Sungai Kahayan – Sungai Kapuas”.

Sumber: Pablo Martin.

C. VALIDASI PRODUK PEMETAAN KELEMBAPAN TANAH (SMM)

Validasi produk SMM telah dilakukan dengan menggunakan data lapangan yang diberikan oleh BRG. Data-data ini dikumpulkan dari lapangan antara tahun 2018, 2019 dan 2020 oleh sistem disebut dengan Sistem Pemantauan Air Lahan Gambut (SIPALAGA⁹). Variabel yang tersedia adalah GWL (m) dan kelembapan tanah (SM) (kg/m²). Untuk setiap variabel, nilai minimal, rerata, dan nilai maksimal disediakan untuk setiap

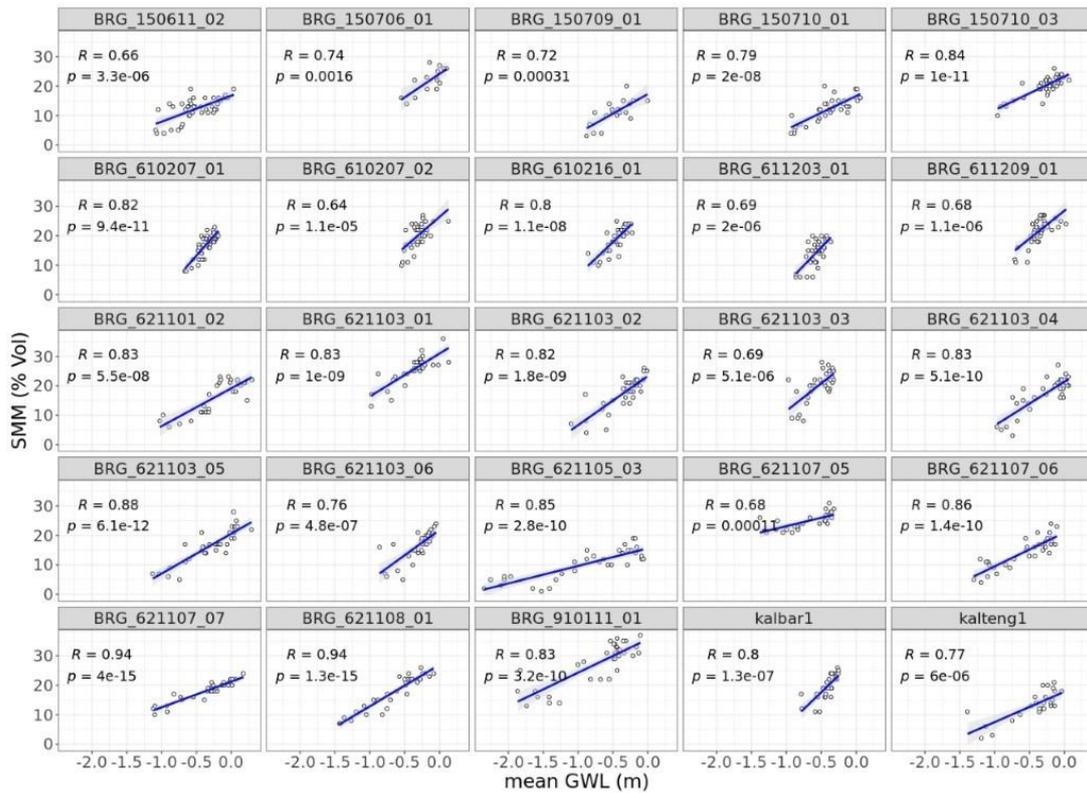
tanggal pengukuran. Korelasi Linear Pearson dihitung dengan menggunakan nilai GWL dan kelembapan tanah terhadap nilai SMM yang tersedia untuk lokasi dan tanggal yang sama. Dengan menggunakan koordinat titik-titik pengukuran SIPALAGA, piksel seluas satu hektar yang tumpang tindih terdekat untuk produk SMM dipilih dan seluruh nilai yang tersedia untuk piksel tersebut dibandingkan dengan pengukuran yang tersedia untuk tanggal-tanggal yang sama.

Ditemukan adanya korelasi yang tinggi dan signifikan antara nilai SMM dan GWL pada beberapa perhitungan, dengan korelasi bervariasi antara 0.63 dan 0.93. Beberapa korelasi antara kelembapan tanah dan SMM juga signifikan, namun pada tingkat yang lebih rendah. Meskipun demikian, ada area di mana model SMM tidak direkomendasikan karena memiliki korelasi yang rendah. Korelasi yang rendah ini mungkin terjadi akibat jenis tutupan lahan atau faktor lain: vegetasi yang padat mungkin mengganggu sinyal radar, permukaan lahan mungkin terdegradasi, dan properti gambut mungkin telah mengubah dinamikanya atau mungkin terjadi kesalahan dalam pengumpulan data lapangan.

Untuk lokasi-lokasi yang menunjukkan koefisien korelasi setara dengan atau lebih tinggi dari 0.5 dilakukan filtering berdasarkan kriteria berikut:

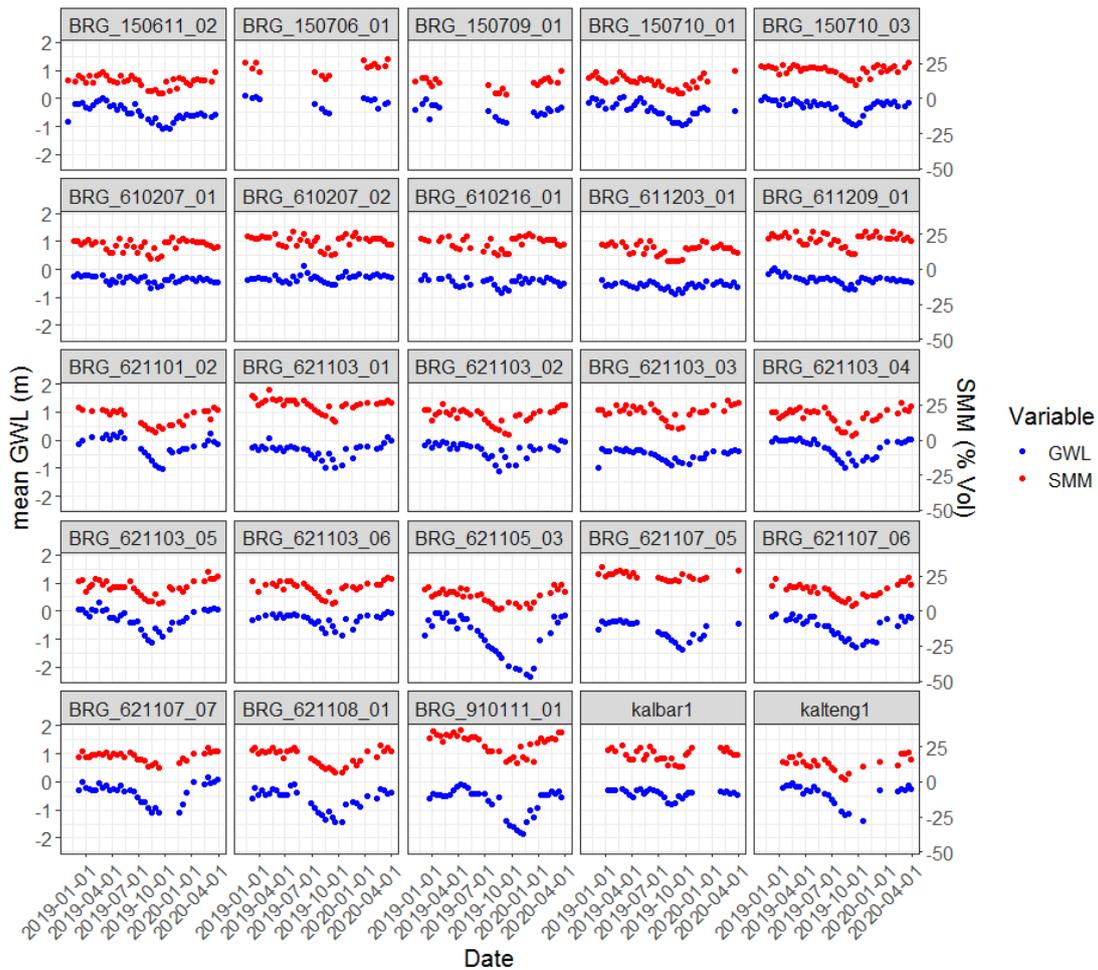
- Hanya korelasi antara GWL–SMM, karena kelembapan tanah tampaknya sering mengalami kesalahan dalam hal pengumpulan data lapangan;
- Lokasi dipilih dengan rentang waktu yang mencakup sebanyak mungkin tanggal atau yang terdistribusi dengan baik di sepanjang tahun dan mengikutsertakan nilai rendah dan nilai tinggi untuk variabilitas yang lebih tinggi (musim kemarau dan hujan secara berurutan);
- Lokasi yang dihindari adalah lokasi di mana data lapangan tampaknya salah atau tidak dapat diandalkan karena adanya variasi yang kuat dalam hal pengukuran, periode yang panjang tanpa pengumpulan data apapun (garis lurus), atau adanya nilai yang sama untuk periode yang panjang (mengindikasikan kemungkinan adanya kesalahan mesin); dan
- Pola antara data lapangan dan data yang disimulasikan, secara visual cukup masuk akal dengan puncak dan lembah yang sesuai di tanggal-tanggal yang sama antara set data (seperti yang ditunjukkan di [Gambar 4.5](#)).

Hasil dari proses filtering ini adalah pemilihan 25 lokasi dari seluruh negeri ([Gambar 4.5](#) dan [Gambar 4.6](#)). Karena korelasi tinggi ditemukan di lokasi-lokasi ini, disarankan agar fitur-fitur tutupan lahan dan fitur fisik seperti struktur vegetasi, topografi, dan struktur tanah telah sesuai untuk pengambilan produk kelembapan tanah yang baik.



Gambar 4.5. Korelasi Pearson dan tingkat signifikansi antara rerata groundwater level (m) dan produk pemetaan kelembapan tanah untuk lokasi-lokasi yang dipilih.

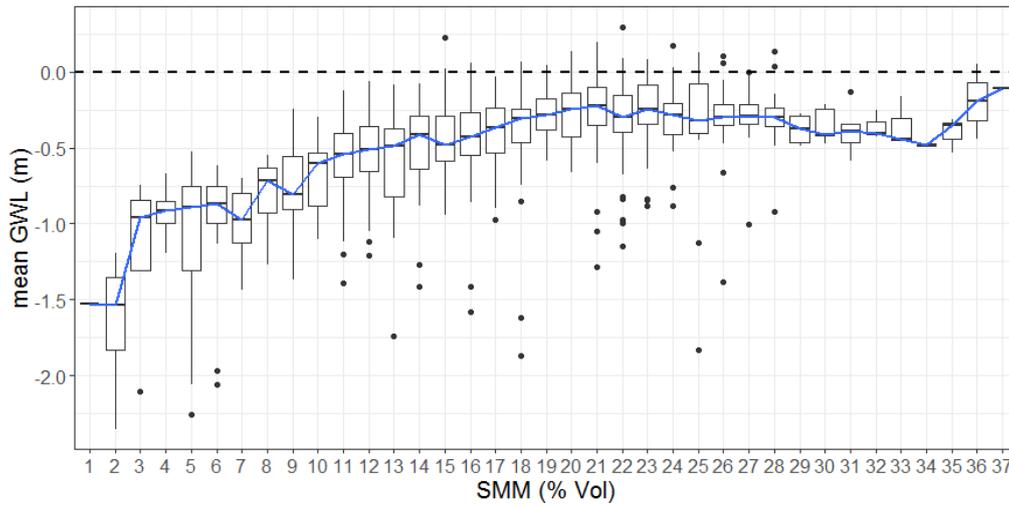
Sumber: Pablo Martin, FAO



Gambar 4.6. Nilai tinggi muka air (GWL) dan pemetaan kelembapan tanah (SMM) untuk lokasi-lokasi terpilih.

Sumber: Pablo Martin, FAO

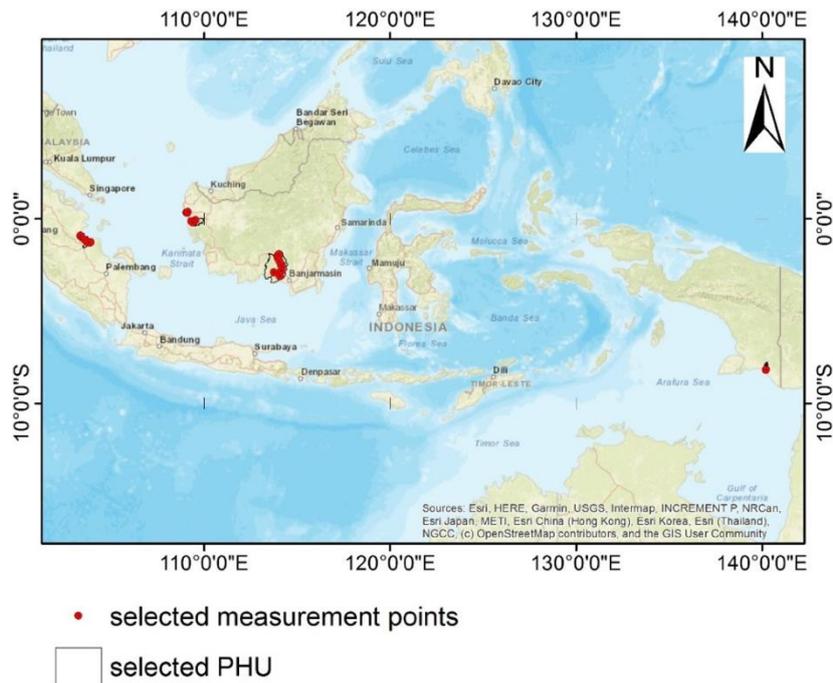
Ketika distribusi data GWL ditampilkan terhadap SMM, terlihat kenaikan GWL pada saat SMM meningkat ([Gambar 4.7](#)). Namun, data yang digunakan dalam analisa ini memiliki ukuran sampel (n=826) dan periode yang terbatas. Produk SMM tersebut hanya pernah dievaluasi dengan data lapangan yang dikumpulkan di akhir tahun 2018, sepanjang 2019, dan di awal 2020 ([Gambar 4.8](#)). Untuk membandingkan model dengan data dari musim kemarau dan hujan, diperlukan data lapangan dari periode yang lebih panjang, yang mempertimbangkan variasi antar-tahun pada tahun-tahun yang berbeda. Kesepakatan data terbaru antara FAO dan BRG telah menyediakan set data yang lebih besar untuk deret yang lebih panjang guna melanjutkan validasi ini. Kesepakatan di masa depan antara FAO dan World Resources Institute dan FAO-NASA sedang dalam proses untuk mengumpulkan lebih banyak data yang beragam ke dalam analisa ini.



Gambar 4.7. Distribusi rerata tinggi muka air (GWL) dibandingkan dengan nilai pemodelan kelembapan tanah (SMM).

Sumber: Pablo Martin, FAO

Terlepas dari hasil yang disajikan di sini, evaluasi korelasi linear adalah pendekatan yang cepat dan mudah untuk memvalidasi data. Membandingkan data dengan data curah hujan dan menguji keterlambatan waktu yang berbeda ketika membandingkan GWL dan SMM juga dapat meningkatkan analisa menjadi lebih baik, karena diketahui bahwa pergerakan air di dalam lapisan lahan gambut didorong oleh faktor-faktor yang kompleks (Jaenicke dkk, 2011).



Gambar 4.8. Titik-titik pengukuran dan kesatuan hidrologis gambut (PHU) yang telah dipilih untuk memvalidasi model pemetaan kelembapan tanah di Indonesia.

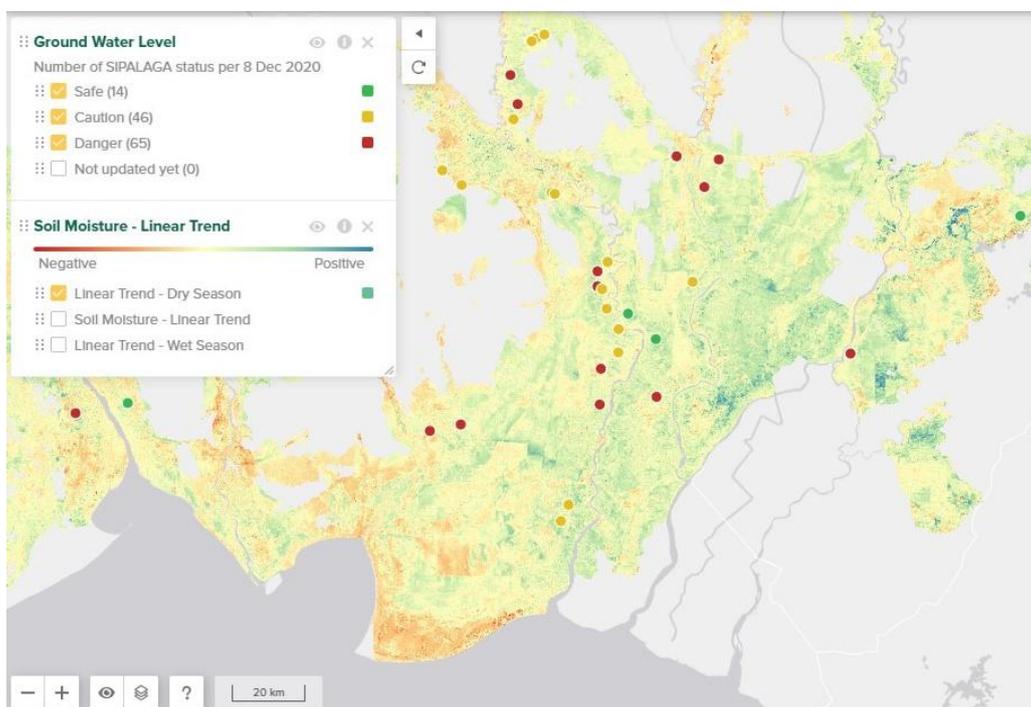
Sumber: Pablo Martin, FAO

Hingga saat ini, sebagian besar titik-titik pengukuran yang digunakan untuk memvalidasi produk SMM seringkali ditempatkan sebagai lokasi yang berdiri sendiri di area yang mudah diakses dan dekat dengan jalan, area pertanian yang telah terdegradasi, atau daerah hutan kayu terbuka. Informasi yang lebih banyak mengenai desain pengambilan sampel SIPALAGA diperlukan untuk dapat menilai sejauh mana data lapangan tersebut terwakili. Distribusi titik-titik pengukuran di sepanjang transek atau dengan distribusi reguler pada lanskap diperlukan untuk dapat mewakili gradien yang berbeda (jarak dari kanal, kedalaman gambut, kepadatan vegetasi atau area kebakaran), yang mempengaruhi dinamika air di lahan gambut. Titik-titik pengukuran yang ditempatkan di daerah yang lebih terpencil atau di bawah vegetasi yang padat, masih jarang. Transek dari titik-titik pengukuran di bawah vegetasi dengan kepadatan yang berbeda-beda, yakni dari lahan gambut terbuka hingga lahan gambut dengan hutan lebat, akan membantu mendeteksi ambang batas dimana kumpulan data GWL-SMM sudah tidak lagi berkorelasi, dengan demikian membatasi kepadatan kanopi untuk memanfaatkan produk SMM.

Meskipun titik-titik validasi yang terbatas yang dipergunakan hingga saat ini, metode ini telah terbukti sebagai satu metode yang kuat untuk mengestimasi SMM dan GWL secara spasial dan menyarankan adanya korelasi dengan emisi GRK. Pekerjaan ini masih terus berjalan, dan sementara itu, data SMM tengah dipertukarkan dengan para mitra lain (WRI Indonesia, proyek kebakaran gambut NASA) dalam peningkatan akses ke berbagai set data yang dapat diandalkan dan dengan jangkauan yang lebih luas untuk GWL dan

kelembapan tanah permukaan untuk membantu agar analisa dari semua tim yang bekerja dalam pemantauan lahan gambut di Indonesia menjadi lebih baik.

Seperti yang ditunjukkan dalam [Gambar 4.9](#), SMM tersedia dalam platform PRIMIS⁸. Produk-produk yang dihasilkan (pola linear dan rata-rata tahunan) mewakili sejumlah data yang dipilih di tahap awal yang menutupi hutan rawa primer dan sekunder, karena keterbatasan penetrasi kanopi di sensor Sentinel-1 C-band. Data pola kelembapan tanah yang ter-*masking* tidak termasuk sekitar 25 persen area dari 107 KHG. *Masking* tutupan lahan dilakukan dengan menggunakan peta tutupan lahan tahun 2015 dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Perlu diingat bahwa peta tutupan lahan yang terbaru tidak dipertimbangkan dalam *masking* ini dan perubahan pada tutupan lahan mungkin telah terjadi.



Gambar 4.9. Pola linear kelembapan tanah untuk musim kemarau dari 2015-2020 dan stasiun-stasiun pengukuran GWL yang terkait seperti ditunjukkan dalam platform PRIMIS.

D. KETERBATASAN INTERPRETASI KELEMBAPAN TANAH DI LANSKAP LAHAN GAMBUT

Dua puluh lima titik pengukuran yang dipilih tidak sepenuhnya mencakup kompleksitas lanskap lahan gambut di Indonesia, namun lokasi-lokasi ini mewakili sekelompok fitur fisik, yang tampaknya paling optimal untuk fungsinya dalam SMM karena ada korelasi yang kuat yang kami temukan antara SMM dan

⁸ <https://en.arjuna.brg.go.id/>

GWL. Oleh karena itu, interpretasi produk SMM dengan data yang tersedia saat ini harus dibatasi pada area-area dengan fitur fisik yang serupa dengan yang diamati pada lokasi-lokasi terpilih.

Untuk membatasi luasan dan validitas produk SMM kami, salah satu pendekatan yang memungkinkan adalah dengan melihat lokasi-lokasi yang memiliki fitur fisik yang sama di seluruh negeri. Dengan tujuan ini, kami telah memilih sekumpulan variabel fisik ([Gambar 4.10](#)), dengan menggunakan *dataset* raster spasial yang penting untuk konfigurasi lanskap lahan gambut dan memiliki pengaruh terhadap perilaku dari komponen utama model SMM, hamburan balik radar (*backscatter*) ([Tabel 1](#)).

Tabel 1 – Daftar set data spasial yang tersedia dan sensitivitasnya terhadap variabel fisik di lanskap lahan gambut.

Set Data	Unit	Resolusi spasial	Deskripsi/ hubungan dengan lanskap gambut
Landsat 2019 Red band⁹	Reflektan (0-255)	30 meter	Reflektan dalam berbagai panjang gelombang memiliki hubungan terhadap perubahan kepadatan vegetasi, biomassa, status kesehatan dan kandungan air, yang membantu untuk membedakan antara jenis tutupan lahan
Landsat 2019 Near-infrared band⁹	Reflektan (0-255)	30 meter	
Landsat 2019 Short-wave infrared band 1⁹	Reflektan (0-255)	30 meter	
Landsat 2019 Short-wave infrared band 2⁹	Reflektan (0-255)	30 meter	
Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI)¹⁰	Tinggi kanopi (meter)	30 meter	Tinggi kanopi secara langsung berhubungan dengan biomassa pohon dan kepadatan vegetasi
Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)-elevasi¹¹	Elevasi (meter)	30 meter	Topografi berkaitan dengan keberadaan lahan gambut, seringkali berlokasi di dataran rendah dengan lereng yang landai
SRTM-slope¹¹	Slope (derajat)	30 meter	
SRTM-aspect¹¹	Aspek (derajat)	30 meter	
Jarak ke kanal¹²	meter	1 meter	Kedekatan terhadap kanal berhubungan dengan lahan gambut yang telah kering dan terdegradasi dibandingkan

⁹ <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>¹⁰ <https://glad.umd.edu/dataset/gedi>¹¹ https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1000000240-LPDAAC_ECS.html¹² Dihasilkan dengan menggunakan jejerang kerja kanal 2016 yang diberikan oleh WRI.

Set Data	Unit	Resolusi spasial	Deskripsi/ hubungan dengan lanskap gambut
			dengan area lahan gambut yang berlokasi lebih jauh
Sentinel-1-StdDev (Simpangan Baku) VV band (2019)	desibel	30 meter	Variasi temporal dari hamburan balik adalah sebuah indikator dari variasi kelembapan tanah. Kanopi hutan permanen menunjukkan variasi yang sangat rendah, sementara tanah gundul atau padang rumput menunjukkan variasi yang lebih tinggi.
Sentinel-1-StdDev (Simpangan Baku) VH band (2019)	desibel	30 meter	

Sumber: FAO, 2020.

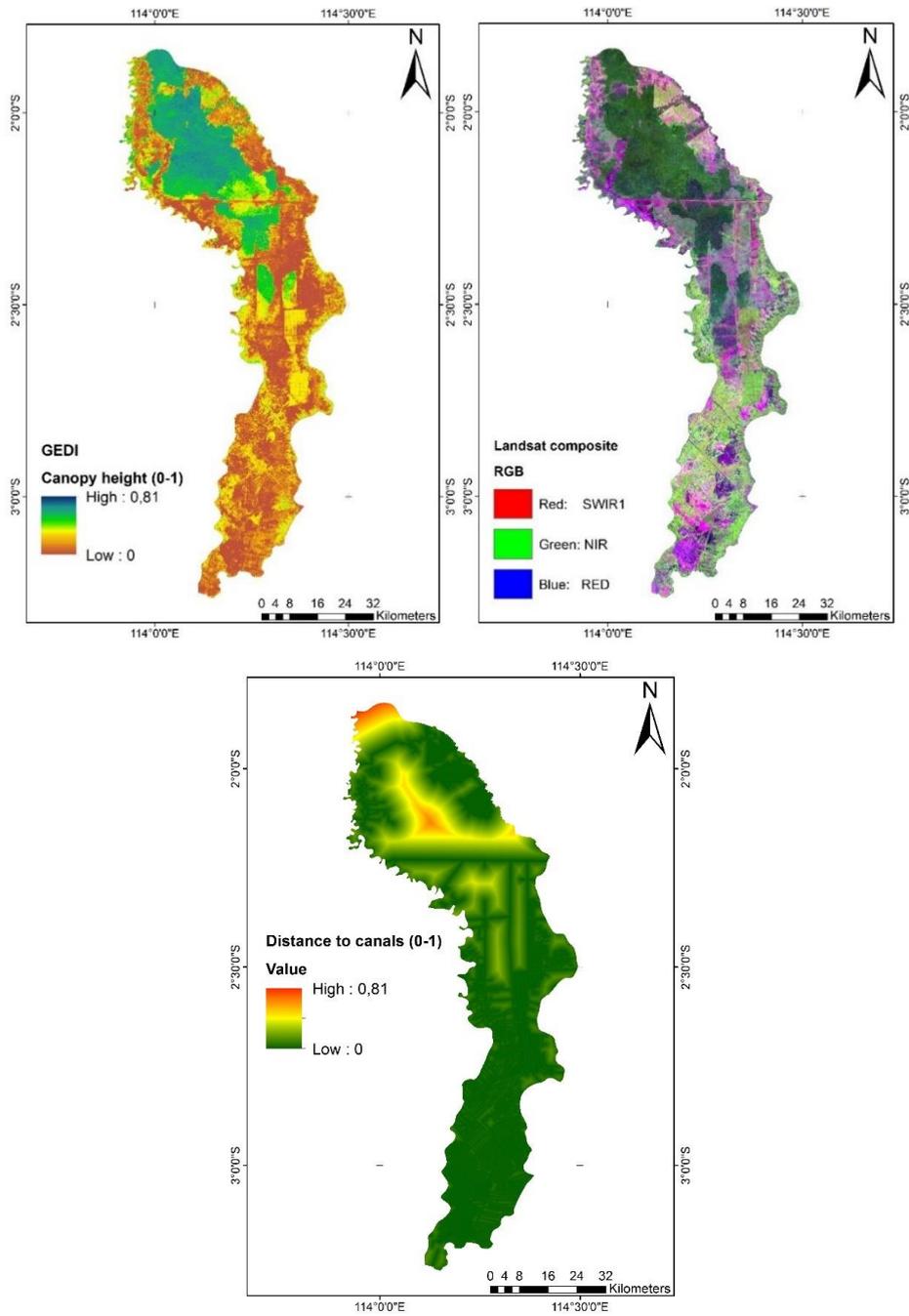
Fitur-fitur titik pengukuran, meskipun mereka dapat serupa dalam hal ketinggian kanopi, topografi, atau jarak ke kanal, adalah tidak identik. Kombinasi yang berbeda dari fitur-fitur ini dapat memberikan kondisi yang sama ke sinyal radar yang memungkinkannya untuk menembus obyek dan mengambil nilai kelembapan tanah yang serupa. Pendekatan pembelajaran mesin digunakan untuk menangkap hubungan kompleks dan hubungan non-linear antara berbagai jenis variabel dipilih serta menentukan area dengan karakteristik yang serupa. Untuk tujuan memasukkan variasi yang tinggi dan keterwakilan data yang lebih tinggi dari seluruh data KHG, sebanyak 14 titik pengukuran ditambahkan ke dalam perhitungan. Titik pengukuran yang baru ini meskipun memiliki jumlah data yang sedikit; yang terkait dengan tanggal, juga menunjukkan korelasi yang sangat signifikan.

Algoritma One-Class Support Vector Machine (OCSVM) dapat diimplementasikan ketika satu kelas spesifik yang menjadi perhatian harus diklasifikasikan dan dipisahkan dari semua kelas-kelas lain (Moya dkk, 1993). OCSVM telah digunakan di bidang penginderaan jauh dan pemodelan ekologis untuk membuat peta berdasarkan klasifikasi biner, yakni “kelas target” dan “kelas outlier”. Dengan menggunakan klasifikasi OCSVM, data dan alokasi pelatihan dapat difokuskan pada kelas target yang spesifik saja, dalam kasus kami adalah fitur-fitur titik pengukuran.

Algoritma OCSVM menganalisa input-input yang dimasukkan dan mendefinisikan kelas target. Pada langkah kedua, OCSVM akan mencari di seluruh data dan menentukan kelas outlier dengan nilai outlier dari kelas

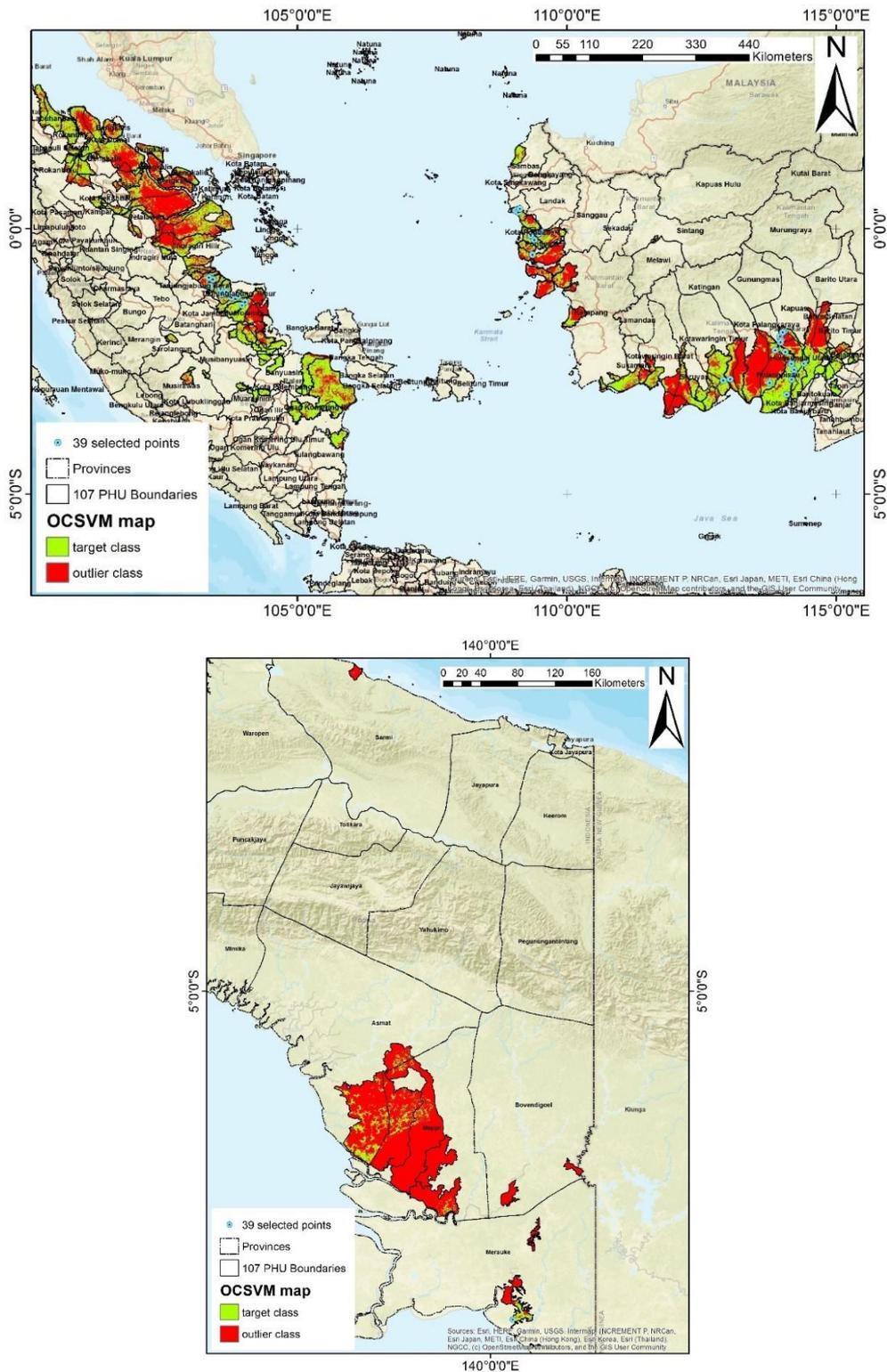
target. Beberapa contoh penggunaan OCSVM diantaranya adalah pemetaan distribusi spesies ([Song dkk, 2016](#)), pemetaan sawah padi ([Xu dkk, 2018](#)) atau klasifikasi tutupan lahan spesifik ([Sanchez-Hernandez dkk, 2007](#)).

Untuk memvalidasi klasifikasi kelas target dan outlier, 65 persen dari titik pengukuran digunakan untuk melatih algoritma dan 35 persen digunakan untuk untuk pengujian. Terakhir, ketika klasifikasi telah diuji pada sampel pengujian, akurasi keseluruhan klasifikasi adalah 97 persen. Luaran dari peta klasifikasi ini adalah citra raster dengan resolusi spasial 30 m yang dapat digunakan untuk membatasi interpretasi produk SMM. Produk ini memiliki klasifikasi biner, kelas target, dimana kita bisa dengan yakin menginterpretasikan produk SMM dan kelas outlier, dimana interpretasi harus dihindari. Kelas target dan outlier diberi warna hijau dan merah secara berurutan dalam contoh di [Gambar 4.11](#).



Gambar 4.10. Contoh tiga set data yang dipilih sebagai input untuk model *One-Class Support Vector Machine*. Tinggi kanopi pohon menggunakan data GEDI (kiri atas), komposit Landsat (SWIR1, NIR, RED) menggunakan set data Hansen (kanan atas), dan jarak ke kanal dihitung menggunakan peta kanal 2016 yang diberikan oleh WRI. Seluruh nilai telah ditransformasikan ke dalam rentang 0-1 untuk digunakan dalam pemodelan.

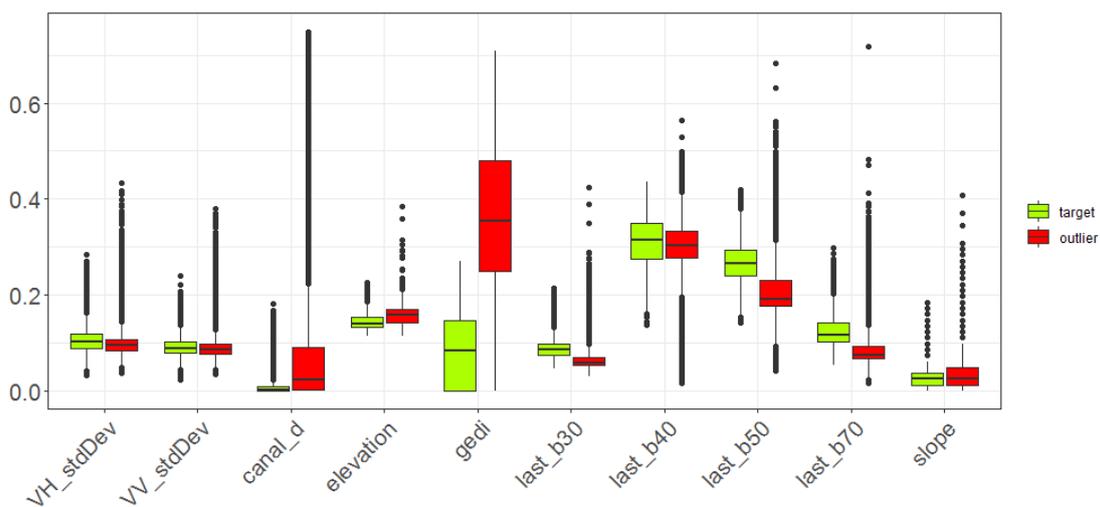
Sumber: Seluruh dataset tersedia di Google Earth Engine, kecuali dataset kanal yang telah ditransformasikan dari data yang diberikan oleh WRI.



Gambar 4.11. One-Class Support Vector Machine mengklasifikasi peta yang menunjukkan batasan spasial untuk menginterpretasikan produk SMM di seluruh target 107 KHG yang didefinisikan oleh BRG, kelas target ditunjukkan dengan warna hijau dan kelas outlier dengan warna merah. Peta dibagi ke dalam dua bagian untuk menjelaskan Indonesia secara keseluruhan.

Sumber: dielaborasi oleh Pablo Martin.

Untuk menginterpretasikan perbedaan antar kelas dari perspektif numerik, 10.000 titik acak secara spasial disebarakan pada masing-masing kelas (total 20.000 titik); kelas target dan kelas outlier. Meskipun kedua kelas menunjukkan distribusi nilai yang serupa terkait topografi, seperti ketinggian (*altitude*) atau kemiringan (*slope*), mereka menunjukkan perbedaan yang ekstrem khususnya pada tinggi kanopi (GEDI) atau jarak ke kanal (*canal_d*). Lokasi-lokasi yang serupa dengan titik pengukuran kelas target menunjukkan jarak yang lebih dekat ke kanal dan nilai tinggi kanopi yang lebih rendah dibandingkan dengan kelas outlier. Reflektan pada *Short-Wave Infrared bands* (SWIR1 dan SWIR2; secara berturut-turut *last_b50* and *last_b70* in [Gambar 4.12](#)), juga lebih tinggi pada kelas target dibandingkan dengan kelas outlier, yang menunjukkan perbedaan kondisi kelembapan vegetasi (vegetasi lebih sedikit dibandingkan dengan vegetasi lebih padat, atau keberadaan komponen tanah yang lebih kuat). Selain itu, ini juga dapat memperlihatkan bagaimana variasi pada nilai hamburan balik (diukur sebagai simpangan baku dari VH dan VV) yang sedikit lebih tinggi pada kelas target, yang mungkin mengindikasikan bahwa area ini lebih sensitif terhadap variasi kelembapan tanah. Pada [Gambar 4.12](#), seluruh variabel di skala-ulang di antara interval (0,1).



Gambar 4.12. Distribusi nilai-nilai yang telah dinormalisasi untuk variabel yang berbeda, yang digunakan sebagai input dalam peta klasifikasi OCSVM. *VH_stdDev* dan *VV_stdDev* : simpangan baku dalam waktu untuk seluruh citra Sentinel-1 yang tersedia di 2019, masing-masing untuk band VH dan band VV; *canal_d*: jarak kanal dalam meter (tahun 2016); *elevation*: elevasi dalam meter (tahun 2000); *GEDI*: tinggi kanopi pohon dalam meter (Tahun 2019); *last_b30,40,50* dan *70*: Landsat 8 Red, NIR, SWIR1 dan SWIR2, secara berurutan (2019); *slope*: kemiringan dalam derajat (Tahun 2000).

Secara ringkas, dengan data yang tersedia sejauh ini, kita bisa yakin bahwa produk SMM dapat diinterpretasikan untuk area-area yang dapat diakses, dekat dengan kanal, dengan ketinggian kanopi yang rendah dan area vegetasi yang relatif terbuka dengan kondisi kelembapan tanah yang rendah. Produk SMM tidak direkomendasikan untuk dipergunakan atau diandalkan untuk area vegetasi yang padat, dimana sangat memungkinkan bahwa Sentinel C-band tidak dapat melakukan penetrasi.

Untuk pengembangan metodologi ini ke depan, data tambahan dapat dimasukkan ke dalam algoritma, seperti kedalaman gambut atau mosaik SAR multitemporal, yang juga diharapkan dapat mempengaruhi interaksi radar dengan kelembapan tanah. Lebih jauh lagi, jumlah titik pengukuran yang lebih banyak di bawah kondisi fisik yang lebih beragam akan bermanfaat dalam meningkatkan keakuratan peta ini. Terakhir, metodologi ini dikembangkan dengan menggunakan data dari 2019 karena sebagian besar data lapangan yang tersedia juga berasal dari tahun tersebut. Namun demikian, karena sering terjadinya perubahan tutupan lahan di Indonesia serta kondisi lapangan yang keras seperti cuaca ekstrim, risiko kebakaran dan perubahan lain, titik pengukuran dapat terpengaruh, dan fitur-fitur mereka dimodifikasi dari waktu ke waktu, juga akan memodifikasi respon dalam nilai hamburan balik radar. Kami merekomendasikan untuk selalu memperbarui peta ini dengan data terbaru yang tersedia.

Informasi Tambahan:

- [Training on interpretation of soil moisture maps](#)
- [Training on combining tools in SEPAL for peatland monitoring](#)

Bagian 5: Kajian dan pengembangan lebih lanjut

Bagian berikut ini adalah refleksi keseluruhan yang disarankan untuk para pembuat kebijakan nasional Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan dan Badan Restorasi Gambut dan Mangrove, serta badan penelitian, masyarakat sipil serta sektor swasta yang bekerja dalam restorasi gambut. Tujuan mereka adalah untuk berbagi ide untuk kajian lebih lanjut serta pengembangan perangkat dan pendekatan. Rekomendasi umum untuk standardisasi metodologi pemantauan lahan gambut adalah untuk mengembangkan yang selaras dengan upaya transparansi UNCCC secara keseluruhan, termasuk kegiatan REDD+, proses pengukuran, pelaporan dan verifikasi (MRV), dan *forest reference levels* (FRLs).

A. PENDEKATAN KOMBINASI SENSOR UNTUK PEMANTAUAN LAHAN GAMBUT

Pelaku yang bertanggung jawab dalam pemantauan lahan gambut didorong untuk melakukan analisa SMM yang didukung dengan data lapangan yang tersedia dari Kesatuan Hidrologis Gambut (KHG). FAO juga merekomendasikan para pembuat kebijakan nasional untuk menyelaraskan berbagai sensor satelit sehingga dapat dimanfaatkan untuk pemantauan lahan gambut, dan menciptakan satu metodologi yang jelas dalam penerapan kombinasi tersebut.

Sentinel-1 sebagai komponen utama dari produk SMM merupakan kandidat terbaik untuk dimasukkan ke dalam metodologi ini. Sensor optik lainnya seperti Landsat atau Sentinel-2 menawarkan karakteristik yang serupa dalam hal resolusi spasial dan temporal. Dalam hal ini, kombinasi data radar dan data optik menjadi hal yang sangat penting, dan BFAST dapat menjadi alat yang kuat untuk memahami perubahan pada tutupan lahan, yang mungkin dapat mempengaruhi hasil interpretasi pola kelembapan tanah. Citra PLANET yang diperoleh baru-baru ini memberikan citra dengan deret waktu yang rapat yang dapat dipergunakan untuk memantau baik penyekatan kanal, kejadian kebakaran tertentu, dan juga perubahan tutupan lahan.

Para peneliti dari organisasi atau kalangan akademis juga diminta khusus untuk menggunakan perangkat dan produk ini guna meningkatkan pemahaman tentang hubungan antara kelembapan tanah dan emisi GRK. Dengan mengetahui karakteristik status degradasi gambut, kerapatan lindak, vegetasi, data historis (termasuk riwayat kebakaran dan pengelolaan), dan kedalaman gambut di area tersebut serta aspek lain dari ekologi gambut pada KHG, ini akan membantu dalam menginterpretasikan produk SMM dan polanya.

B. DISTRIBUSI SPASIAL TITIK PENGUKURAN LAPANGAN

Perangkat SEPAL SMM sensitif terhadap kelembapan tanah karena menggunakan model yang telah dikalibrasi secara global dan telah divalidasi dengan menggunakan data lapangan. Pola SMM menunjukkan korelasi yang kuat dengan data lapangan dan t langkah-langkah telah diambil untuk menguji lebih lanjut

dan mengkalibrasi suatu model dengan menggunakan data lapangan dari Indonesia. Pengujian menggunakan data lapangan lokal menunjukkan bahwa akurasi model ini akan semakin baik dengan data lapangan dengan rentang waktu yang lebih panjang dan sampel latihan yang lebih banyak.

Untuk membuat model SMM yang dikalibrasi secara lokal, alur kerja di balik pySMM ([Greifeneder dkk, 2019](#)) perlu direproduksi dan dijalankan kembali dengan format data latihan yang telah benar. Sebagai tambahan, perumusan suatu hubungan (persamaan) antara GWL dan SMM berdasarkan data lapangan masih tertunda.

Untuk meningkatkan proses validasi produk SMM, diperlukan lebih banyak titik validasi (titik pengukuran lapangan), dan data harus "dibersihkan" untuk menghilangkan data dengan kualitas rendah sehingga dapat memproses dalam jumlah besar. Dalam hal ini, pemerintah akan bertanggung jawab atas jejaring kerja pengukuran lapangan yang solid, yang sangat penting dalam membangun sebuah sistem pemantauan lahan gambut yang kuat di seluruh negeri.

Harmonisasi dan pertukaran data lapangan secara terbuka menjadi hal yang penting dalam mengoptimalkan analisa dan validasi data SMM, serta lebih memahami dampak jangka pendek dan dampak jangka panjang dari restorasi lahan gambut. Mengingat frekuensi ketersediaan data satelit dan lapangan, hal ini akan membantu dalam mendeteksi masalah selama pengumpulan data dan dapat memberikan solusi tepat waktu. Para akademisi di tingkat nasional, badan teknis internasional atau perusahaan swasta yang membangun titik pengukuran lapangan untuk tujuan komersial dan non-komersial, juga didorong untuk menggunakan perangkat dan produk SMM guna mengevaluasi kinerja mereka.

Idealnya, akan lebih baik jika data pemantauan (baik produk lapangan dan penginderaan jauh) dapat lebih mudah diakses oleh para peneliti dan jika dimungkinkan, tersedia dengan gratis. Jika diperlukan kesepakatan berbagi data, maka kami menyarankan untuk menggunakan pendekatan standar yang sederhana dengan pengakuan penyedia sumber data asli, yang berguna untuk mendorong berbagi data dengan lebih luas. Ini dapat membantu meningkatkan kualitas hasil dan mempercepat perbaikan guna mendapatkan produk data dan pemantauan yang lebih baik.

C. SARAN-SARAN PENGEMBANGAN KAPASITAS

Meskipun manual ini memberikan instruksi mengenai langkah demi langkah yang jelas untuk menghasilkan produk pemetaan kelembapan tanah, sangat disarankan agar petugas teknis yang menggunakan perangkat ini untuk ikut dalam pelatihan atau jika tidak mereka telah memiliki pengalaman menggunakan sensor radar dan sensor optik yang digunakan dalam pemantauan hutan. FAO memberikan beberapa sumber daya

dan pelatihan untuk menggunakan perangkat yang tersedia dengan gratis yang berhubungan dengan pemantauan lahan gambut di Indonesia.

Pengetahuan sebelumnya tentang perangkat Open Foris tersedia pada laman (<http://www.openforis.org/>), dan pengetahuan tentang bahasa *Javascript* dan *Python* yang masing-masing digunakan di *Google Earth Engine* dan SEPAL akan menjadi satu keuntungan. Pemrosesan komputer *cloud* merupakan fundamen dari perangkat yang disajikan di sini dan akan menjadi sangat penting pada saat mengembangkan perangkat pemantauan yang kuat pada skala yang lebih besar dan tingkat nasional. FAO telah memberikan beberapa pelatihan tatap muka dan online selama tahun 2019–2020 untuk mengembangkan kapasitas lebih dari 100 pemangku kepentingan di Indonesia, dan siap untuk terus mendukung segera setelah sumber daya lanjutan tersedia.

D. INTEGRASI ALAT DALAM UPAYA MONITORING YANG LEBIH LUAS

Kombinasi dari data penginderaan jauh dan data yang dikumpulkan di lapangan merupakan inti dari Sistem Monitoring Hutan Nasional (SIMONTANA). Dengan menambahkan variabel yang relevan untuk lahan gambut pada alur Inventarisasi Hutan Nasional yang sudah terbentuk, maka kita akan mendapatkan metodologi reguler yang sudah mapan yang dapat dipergunakan dalam pengumpulan data lapangan. Pendekatan pembelajaran-mesin yang digunakan dalam perangkat SMM menyoroti bahwa teknik ini dapat memberikan analisa yang lebih cepat dan lebih akurat, dan pendekatan semacam ini juga dapat digunakan untuk sistem pemantauan lahan berbasis satelit di Indonesia. Karena SIMONTANA secara bertahap sedang ditingkatkan dan didisain ulang, ini membuka peluang bagi pengembangan sistem lebih lanjut agar dapat menangkap pemantauan lahan gambut dengan lebih baik.

E. PEMANTAUAN PEMBASAHAN LEVEL LANSKAP

Seperti digarisbawahi oleh seluruh mitra teknis dan pakar gambut, pembasahan lahan gambut harus dilakukan di tingkat lanskap, artinya di seluruh KHG untuk mendapatkan hasil terbaik. Direkomendasikan untuk melakukan analisa SMM di KHG di mana semua kanal telah disekat, untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik mengenai indikator restorasi lahan gambut. BRG telah mengusulkan untuk fokus pada pembuatan kasus-kasus di Riau dan Kalimantan Tengah guna menunjukkan apa yang dapat dicapai dari pembasahan menyeluruh, dalam hal restorasi gambut. Cerita-cerita sukses tentang pembasahan di lokasi restorasi akan memiliki peran sangat penting dalam menunjukkan efektivitas produk SMM dan kekuatannya sebagai alat pemantauan gambut nasional yang potensial. Direkomendasikan agar Badan Restorasi Gambut dan KLHK mengevaluasi alat di lokasi-lokasi yang diketahui, guna mendapatkan pemahaman yang mendalam mengenai kekuatan, kelemahan, dan keterbatasannya. FAO menyambut baik

masuk mengenai alat-alat ini dan siap untuk melanjutkan pengembangannya jika dana dan sumber daya telah tersedia.

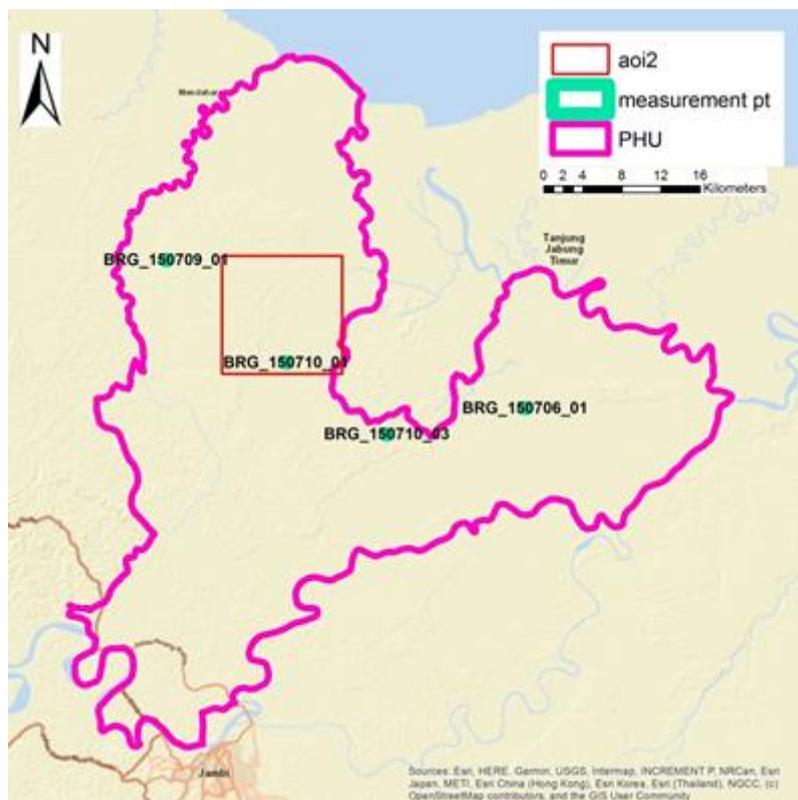
Sebelum KHG dibasahi sepenuhnya, hasil SMM dari pembasahan sebagian – hanya dengan menyekat kanal-kanal tertentu – utamanya hanya akan menunjukkan seberapa sensitif alat SMM terhadap perubahan kelembapan. Ini kemungkinan besar tersedia untuk pengamatan lapangan melalui vegetasi yang dapat tumbuh di daerah gambut yang dibasahi sebagian, dibandingkan dengan daerah yang dibasahi sepenuhnya. Hasil dan metode yang ditunjukkan dalam laporan ini telah membuktikan potensi besar dari penginderaan jauh dan kekuatan supercomputer dengan perangkat lunak bersumber terbuka dalam pengembangan analisis di Indonesia, dan berpotensi di negara-negara lain.

Bagian 6: Latihan

Pengantar

Tujuan dari latihan ini adalah untuk menghitung dan mengunduh produk SMM pada area studi dan menginterpretasikan hasilnya. Data pembantu akan diberikan untuk membantu memberikan justifikasi atas keputusan Anda.

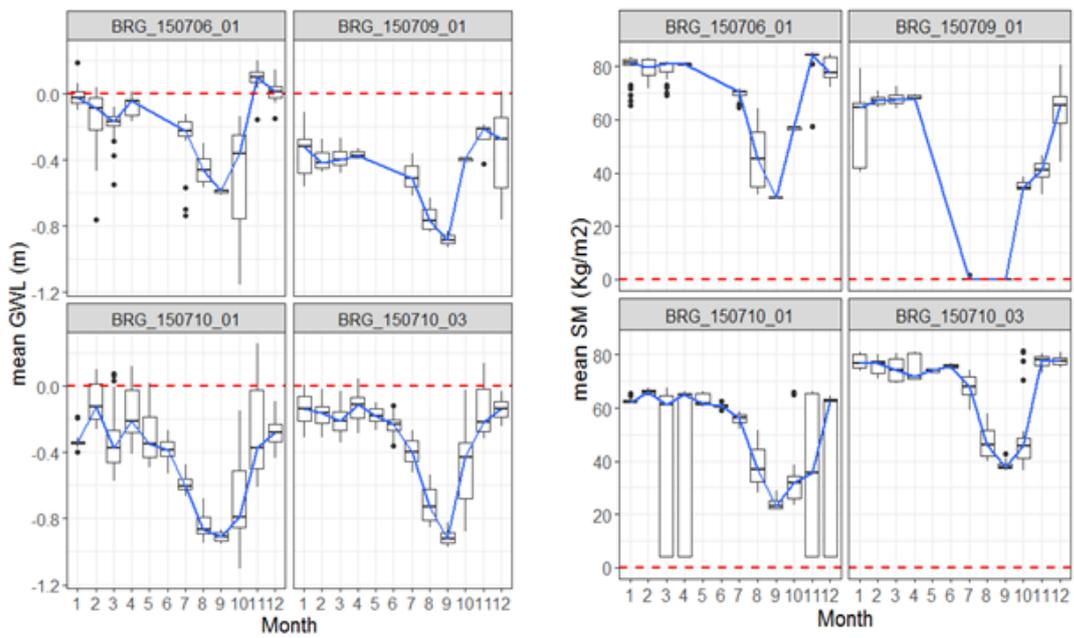
Area studi



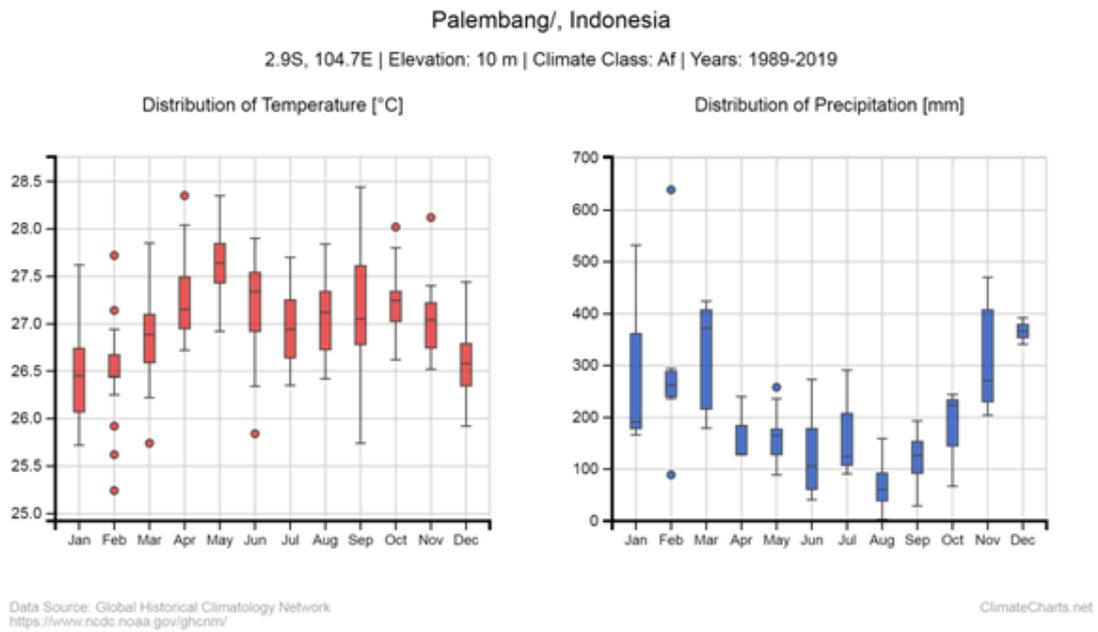
Gambar 6.1. Lokasi AOI (merah) di dalam “KHG Sungai Mendahara - Sungai Batanghari” di provinsi Jambi.



Gambar 6.2. Peta tutupan lahan tahun 2019 dan elemen-elemennya (bendungan) di dalam AOI.



Figur 6.3. Rerata GWL (kiri) dan rerata kelembapan tanah (kanan) yang diukur di lapangan antara tahun 2018-2020 untuk stasiun-stasiun yang tersedia di KHG Sungai Mendahara - Sungai Batanghari.



Gambar 6.4. Data suhu dan presipitasi pada lokasi yang terdekat dari area penelitian. Data meteorologi yang terdekat yang tersedia adalah di Palembang¹³

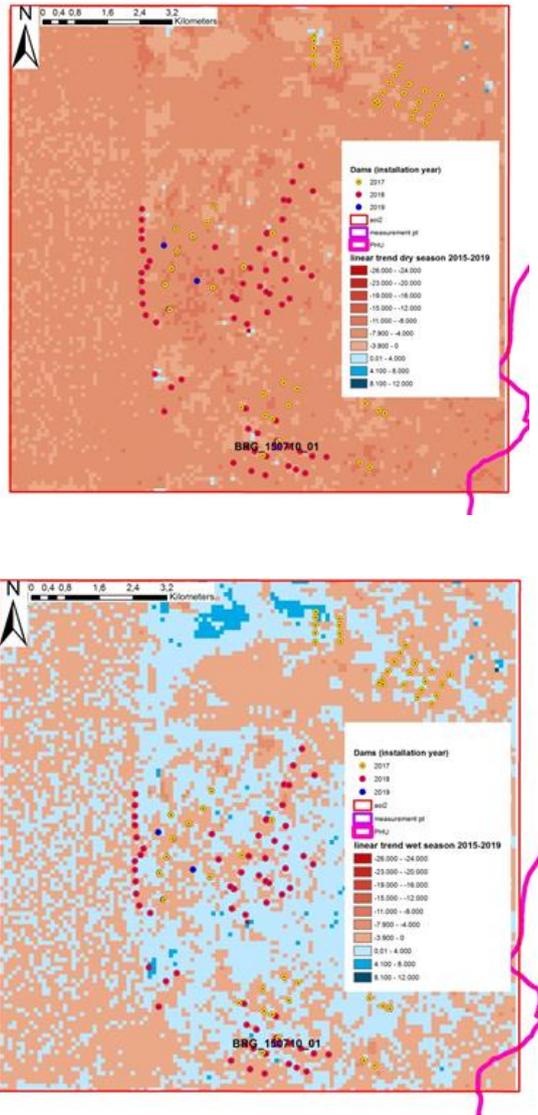
¹³ <https://climatecharts.net/>

Ambil langkah: Komputasi produk SMM pada AOI

1. Gunakan file “**aoi2.shp**” ([link](#)) dan impor sebagai asset ke dalam akun GEE Anda **ATAU** gunakan e-table ini: ***users/marortpab/FAO/indonesia/BFAST/aoi2***
2. Pilih satu rentang tanggal untuk menghasilkan citra Anda (komputasi semua citra yang tersedia hingga saat ini untuk AOI tersebut, memerlukan waktu sekitar 5-6 jam)
3. Hitung semua statistik yang Anda inginkan (rata-rata, simpangan baku, pola linear)
4. Gunakan informasi pembantu yang diberikan atau data spasial yang Anda miliki untuk menginterpretasikan perubahan pada kelembapan tanah di dalam AOI
5. Ikuti langkah-langkah berikut: [LANGKAH](#)

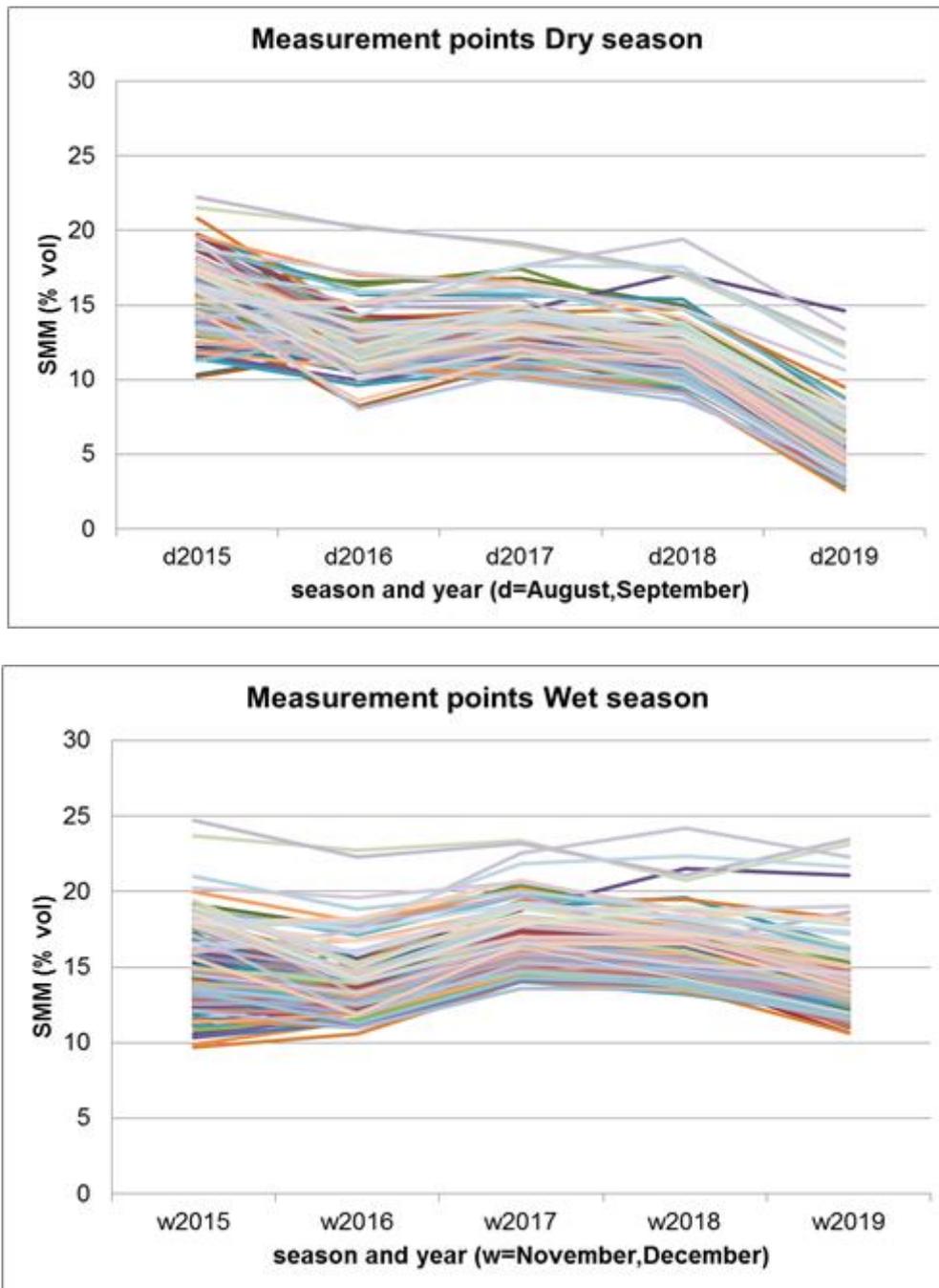
Kemungkinan analisa

1. Plot GWL dan kelembapan tanah menunjukkan bahwa nilai minimal ditemukan pada Agustus-September (musim kemarau) dan nilai maksimal sekitar November-Desember (musim hujan). Pilihlah bulan-bulan ini untuk menjalankan statistik Anda dan bandingkan antar tahun.
2. Untuk melihat pola temporal, gunakan statistik tren linear antar musim-musim yang sama untuk tahun-tahun yang berbeda.
 - Bagaimana Anda menginterpretasikan apa yang Anda lihat?
 - Apakah kelembapan tanah meningkat atau menurun?
 - Apakah penyekatan kanal memiliki dampak? Mengapa?
 - Apakah tutupan lahan memiliki dampak? Mengapa?

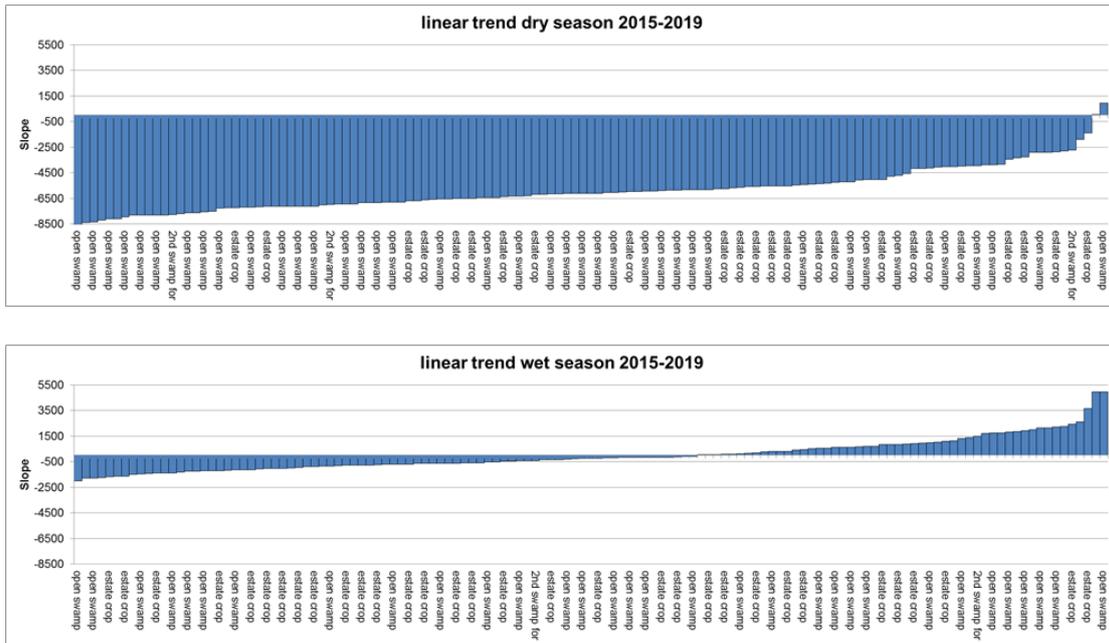


Gambar 6.5. Pols linear pada musim kemarau (atas) dan musim hujan (bawah).

Gunakan data spasial yang Anda miliki untuk menjelaskan perubahan yang mungkin terjadi, kegiatan restorasi, daerah yang baru-baru ditanami, area yang terbakar, dan lain-lain. Ekstrak nilai dari statistik Anda terhadap fitur-fitur tersebut dan cobalah menjelaskan apa yang terjadi.



Gambar 6.6. Nilai rerata SMM dihitung untuk musim kemarau (atas) dan musim hujan (bawah) dan dibandingkan sepanjang tahun 2015–2019. Masing-masing garis mewakili bendungan yang terdapat pada AOI.



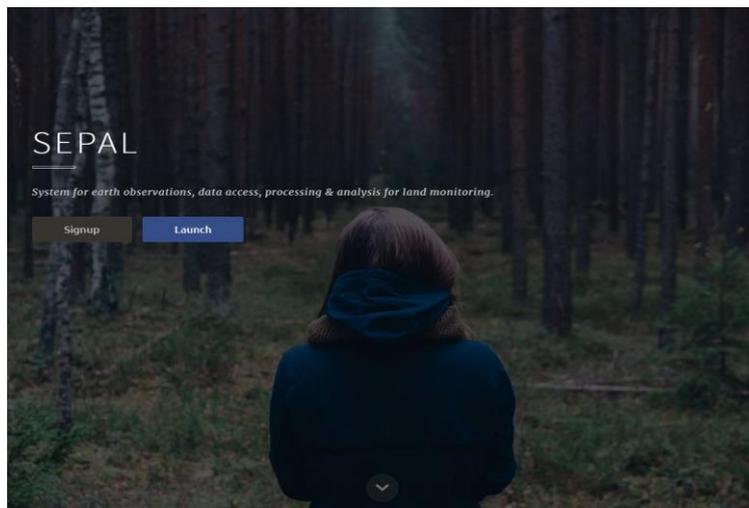
Gambar 6.7. Pola linear dihitung untuk musim kemarau (atas) dan musim hujan (bawah). Nilai-nilai ini mewakili kemiringan pola linear. Masing-masing bar mewakili satu bendungan di dalam AOI dan sumbu horisontal menunjukkan tutupan lahan di sekitar bendungan untuk tahun 2019.

Lampiran 1. Penggunaan platform SEPAL

PLATFORM FAO UNTUK OBSERVASI BUMI

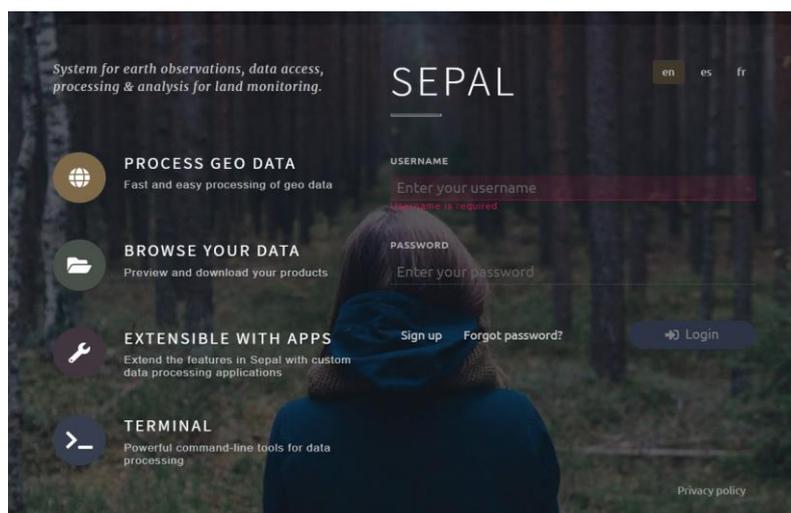
Langkah 1: Log-in ke SEPAL

Langkah pertama dalam pemrosesan adalah memulai sesi SEPAL. Untuk melakukan hal ini buka halaman awal SEPAL (sepal.io) (Gambar 7.1), klik launch dan masukkan username dan password Anda (Gambar 7.2). Jika Anda belum memiliki akun SEPAL, silahkan registrasi [di sini](#).



Gambar 7.1. Halaman awal SEPAL platform I “launch”.

Sumber: <https://sepal.io/>



Gambar 7.2. Halaman awal SEPAL platform II, masukkan username dan password.

Sumber: <https://sepal.io/>

Jika Anda belum memiliki username dan password, Anda dapat mendaftar untuk memperolehnya dengan cara mengetuk 'sign up'. Anda akan dipandu untuk mengisi satu formulir sederhana berisikan nama Anda, alamat e-mail, insitusi, negara, dan alasan ingin menggunakan SEPAL. Isilah informasi ini dan Anda akan menerima e-mail berisi username Anda dan akses ke SEPAL. Anda akan diminta untuk membuat password. Proses ini memakan waktu satu hingga 2 hari hingga selesai karena semua permintaan pengguna ditinjau secara manual.

GUNAKAN TERMINAL UNTUK MEMULAI SEBUAH INSTANCE

Pertama, ketuk tombol terminal  pada daftar ikon di sebelah kiri layar. Ini akan membawa Anda ke *prompt* dan membuat Anda dapat memulai komputer dalam *cloud* SEPAL, yang disebut dengan 'instance'.

Jika tidak ada *instance* yang tengah Anda jalankan, Anda akan melihat opsi untuk memulai sesi baru dan daftar *instance* (Gambar 7.3). Ketik nama *instance* yang Anda inginkan untuk dimulai di *prompt*. Untuk menghentikan sesi yang telah dimulai sebelumnya, masukkan '1s' di *prompt*.

JENIS INSTANCE APA YANG SAYA PERLUKAN?

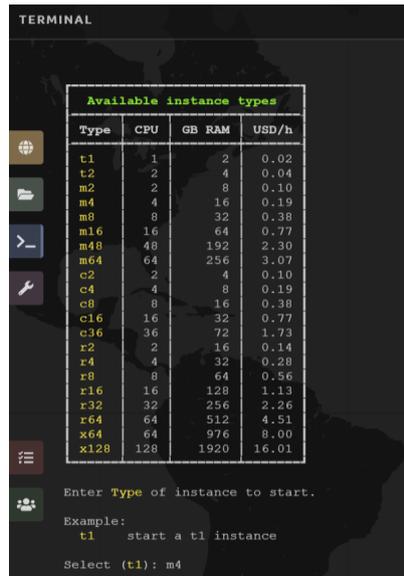
Ini adalah praktik yang bagus untuk menyesuaikan jenis *instance* sesuai dengan kebutuhan Anda agar sumber daya menjadi efisien dan terjadi kinerja konektivitas yang baik saat Anda melakukan analisa.

Contohnya, jika Anda menjalankan *soil moisture download* di *Jupyter notebook*, Anda tidak memerlukan banyak daya pemrosesan karena isi pemrosesan dikirim ke *Google Earth Engine* (GEE) (lihat lebih banyak mengenai GEE ada pada sesi 'Menyambungkan akun Google Anda ke SEPAL' berikutnya). Anda dapat menggunakan *instance* t2 atau m4. Pada bagian pasca-pemrosesan pemetaan kelembapan tanah, aplikasi (app) membutuhkan CPU dan RAM yang lebih besar, dan direkomendasikan menggunakan *instance* m4 atau m8. *Instance* yang lebih kecil dapat memperlambat proses dan berkemungkinan menyebabkan *crash* jika tidak tersedia memori yang cukup untuk memroses citra.

Jika sebuah app telah dipilih di SEPAL tanpa sebelumnya memilih *instance* di terminal, *instance* t1 yang memiliki satu CPU dan RAM sebesar dua GB secara otomatis akan dijalankan.

Jika Anda ingin menjalankan kalkulasi yang lebih rumit dengan obyek yang besar (raster skala nasional), Anda mungkin harus memilih *instance* yang lebih besar dengan persyaratan RAM yang lebih besar.

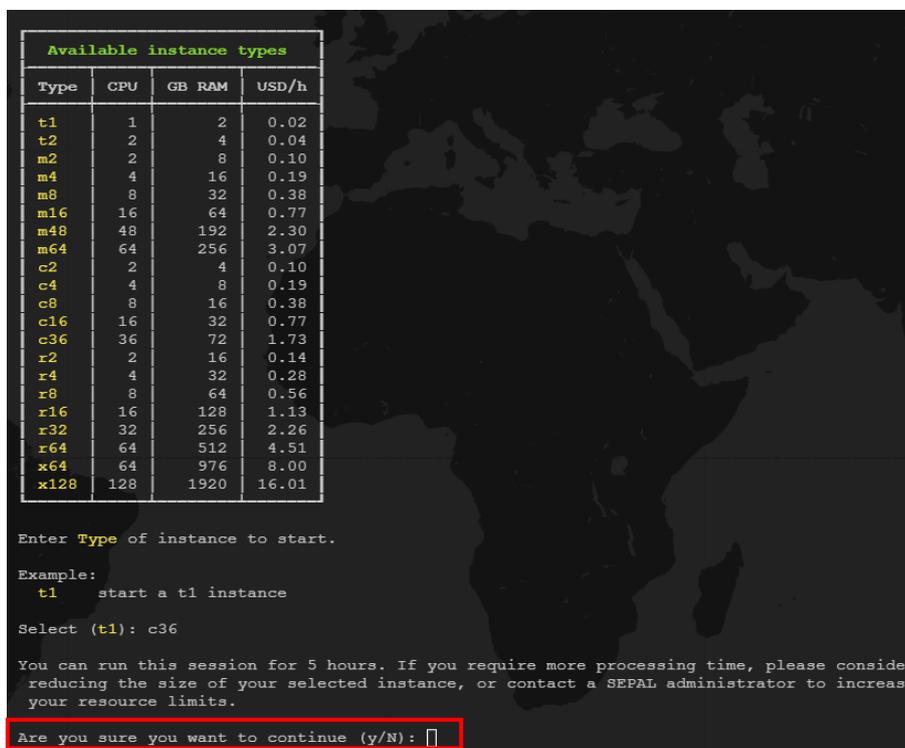
Untuk memilih *instance*, Anda perlu mengetik "Tipe" *instance* pada baris pertama dari tipe *instance* yang tersedia, sesuai dengan *instance* yang ingin Anda jalankan. Contohnya, untuk menjalankan *instance* t1 di terminal, ketik t1, dan tekan tombol ENTER pada keyboard. Baris perintah (*command line*) hanya akan bekerja dengan mengetik teks pada terminal.



Gambar 7.3. Daftar *instance* yang tersedia di platform SEPAL. Untuk memulai *instance*, masukkan tipe *instance* yang ingin Anda mulai di *prompt*.

Anda kemudian akan melihat teks tentang jumlah waktu untuk menjalankan sesi sesuai dengan sumber daya user Anda.

1. Jika sumber daya user Anda terbatas, maka Anda akan ditanya apakah mau melanjutkan dengan menyalakan *instance* tersebut.



Gambar 7.4. Permintaan persetujuan saat sumber daya terbatas

2. Jika Anda ingin melanjutkan, ketik **y** (yang artinya yes/ya) pada terminal. Jika tidak, jika Anda ingin memilih tipe *instance* yang lain ketik **N** (yang artinya no/tidak).
3. Jika Anda memiliki banyak sumber daya, Anda tidak akan melihat teks seperti ini.

Diperlukan waktu sekitar satu menit untuk memulai suatu *instance*. Anda akan melihat teks yang menyatakan, 'Please wait...'

```
You can run this session for 5 hours. If you require more processing time, please consider
reducing the size of your selected instance, or contact a SEPAL administrator to increase
your resource limits.

Are you sure you want to continue (y/N): y

Session is starting. This might start a new server, which could take several minutes.
Please wait.....
```

Gambar 7.5. Menunggu untuk memulai suatu instance

Ketika sesi telah selesai dimuat Anda akan melihat username@numbersandletters:~\$

```
Session is starting. This might start a new server, which could take several minutes.
Please wait.....

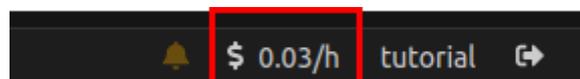
tutorial@1b7511e1e27c:~$
```

Gambar 7.6. Sesi telah selesai dimuat

MENJAGA AGAR INSTANCE TETAP AKTIF

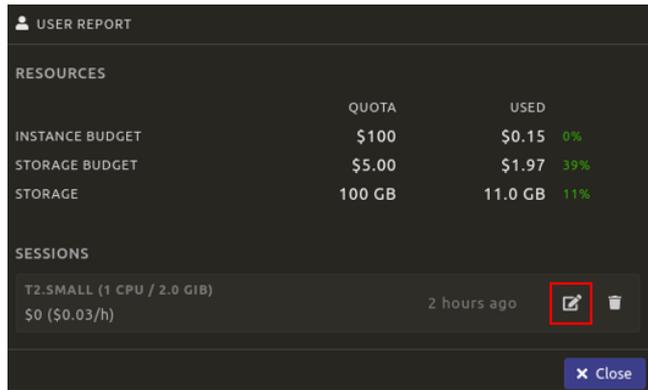
Anda dapat menjaga agar *instance* tetap aktif dengan cara manual pada sumber daya user Anda, yang dapat diakses dengan mengetuk *instance budget*.

1. Ketuk budget:



Gambar 7.7. Anggaran yang tersedia

2. Ketuk ikon edit:

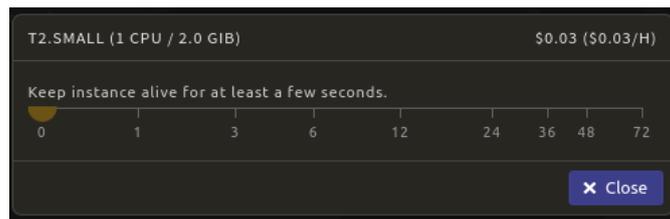


Gambar 7.8. Ikon edit pada user report

Gunakan *slider* untuk memilih jumlah waktu agar *instance* tetap aktif. Anda dapat menjaga agar *instance* tetap aktif hingga 72 jam. Fitur ini hanya digunakan jika Anda menggunakan satu proses yang diketahui memerlukan *instance* yang tetap aktif, seperti pada analisa deret waktu. Pastikan untuk memeriksa proses



untuk memastikan sesuatu tengah dijalankan di *instance*.



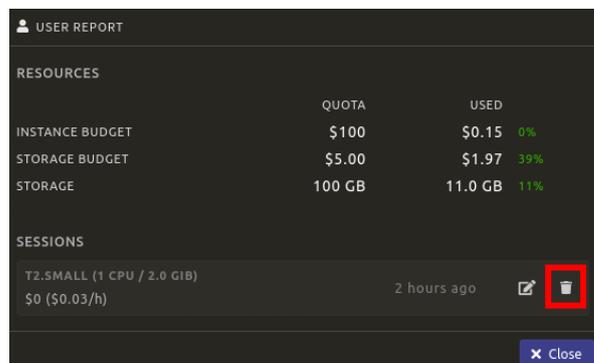
Gambar 7.9. Geser untuk memilih jumlah waktu untuk menjaga agar instance tetap aktif

MATIKAN INSTANCE YANG ADA

Anda dapat mematikan *instance* di *user resources* secara manual, yang dapat diakses dengan mengetuk *instance budget* (Gambar 7.7).



Ketuk di sebelah *instance* yang sedang berjalan untuk mematikan *instance* yang ada.



Gambar 7.10. Matikan instance yang ada

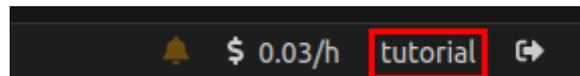
APA YANG DAPAT SAYA LAKUKAN DI TERMINAL?

SEPAL dijalankan dengan server Linux dengan sistem operasi Ubuntu yang versi terbaru dan berjangka-panjang dengan Bash Shell yang sesuai. Anda dapat menjalankan perintah dasar Linux di terminal. Tersedia juga beberapa pustaka pemrosesan geospasial seperti GDAL/OGR¹⁴ atau Orfeo Toolbox¹⁵ dan Anda dapat menjalankan perintah pemrosesan dari terminal. Anda juga bisa mengkloning, memperbaharui, dan memaksa repositori GIT¹⁶ secara langsung di terminal.

MENYAMBUNGAN AKUN GOOGLE ANDA KE SEPAL

Beberapa fungsi inti SEPAL memanfaatkan Google Earth Engine (GEE). Agar dapat memanfaatkan SEPAL secara penuh Anda perlu menyambungkan akun Google Anda ke akun SEPAL Anda.

- Pertama, pastikan Anda memiliki akun Google, dan telah terdaftar di GEE.
- Jika Anda tidak memiliki akun GEE yang telah diaktifkan, sign up [di sini](#).
- Setelah Anda menerima email yang mengonfirmasi akses ke Google Earth Engine Anda dapat menyambungkan akun SEPAL Anda ke Google.
- Ketuk *username* Anda di sudut kanan bawah.



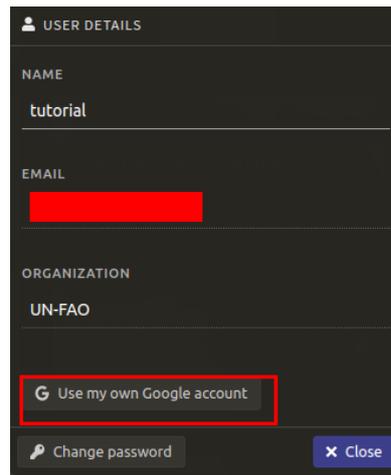
Gambar 7.11. *Username* di sudut kanan bawah

- Jika Anda melihat *'Use my own Google account'*, akun Google Anda belum tersambung ke SEPAL. Pada langkah-langkah berikut, Anda akan menyambungkan akun Anda.
- Pertama, ketuk *'Use my own Google account'*. Ini akan mengarahkan Anda ke halaman Google sign-in.

14 GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction Library (www.gdal.org)

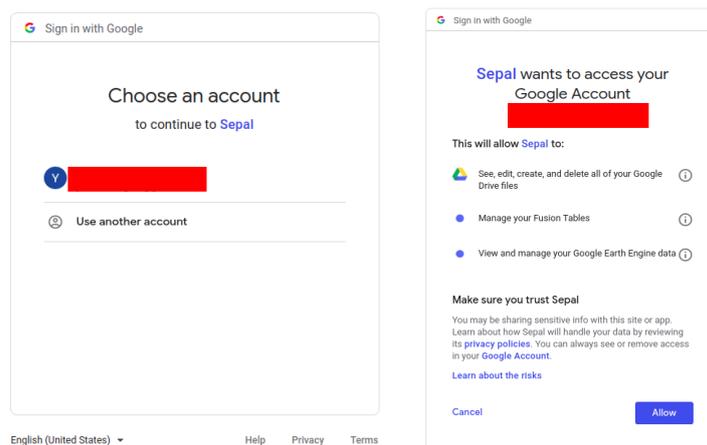
15 www.orfeo-toolbox.org

16 Sistem version-control terdistribusi untuk melacak perubahan pada source code selama pengembangan software (<https://github.com/>)



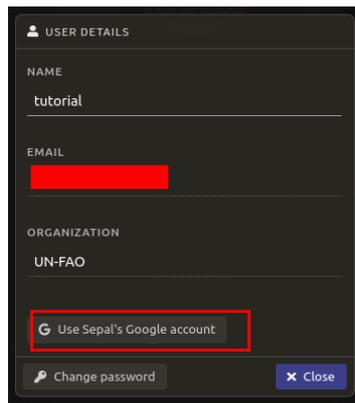
Gambar 7.12. Detail user, ketuk 'Use my own Google account'

- Pilih akun Google yang telah disetujui untuk penggunaan GEE. Masuk ke akun Anda dengan password Google Anda. Lalu ketuk 'Allow' untuk memberikan akses ke akun Google Anda kepada SEPAL.



Gambar 7.13. Pilih akun google Anda dan berikan akses ke SEPAL

- Setelah mengetuk 'Allow', secara otomatis Anda akan diarahkan ke halaman SEPAL. Anda dapat memeriksa koneksi akun Google Anda dengan kembali mengetuk *username* Anda. Sekarang harusnya tertulis 'Use SEPAL's Google account'. Jangan klik tombol ini karena akan memutuskan koneksi antara akun SEPAL pribadi Anda dengan akun Google pribadi Anda.



Gambar 7.14. Cek koneksi akun Google Anda

Informasi Tambahan:

- Apa itu SEPAL? <http://www.openforis.org/tools/sepal.html>
- Tautan SEPAL di GitHub: <https://github.com/openforis/sepal/wiki>

REFERENSI

- Badan Restorasi Gambut.** 2020. Monitoring Peatland restoration in Indonesia. [Power point slides]. <https://www.cifor.org/knowledge/slide/16607>
- Baird, A. J., Low, R., Young, D., Swindles, G. T., Lopez, O. R. & Page S.** 2017. High permeability explains the vulnerability of the carbon store in drained tropical peatlands. *Geophysical Research Letters*, *44*(3):1333–1339. <https://doi.org/10.1002/2016GL072245>
- CEOS.** 2018. A Layman’s interpretation guide to L-band and C-band synthetic aperture radar data version 2.0. Comm. *Earth Obs. Satell. Syst. Eng. Off.*
- FAO.** 2014. Towards climate-responsible peatlands management. Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i4029e.pdf>
- FAO.** 2020. Peatland mapping and monitoring Recommendations and technical overview. Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/CA8200EN/CA8200EN.pdf>
- Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., & Cherrington, E.** 2019. The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. <https://servirglobal.net/Global/Articles/Article/2674/sar-handbook-comprehensive-methodologies-for-forest-monitoring-and-biomass-estimation>
- Greifeneder, F., Khamala, E., Sendabo, D., Wagner, W., Zebisch, M., Farah, H. & Notarnicola, C.** 2019. Detection of soil moisture anomalies based on Sentinel-1. *Phys. Chem. Earth*, *112*:75–82. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.11.009>
- Hashim, H., Busu, I., Sim, S. H., Jong, T. K., Wan Kadir, W. H., & Salam, N. D.** 2002. Soil moisture, depth of water table and peat decomposition in Sadong Simunjan river basin, Sarawak using AIRSAR/TOPSAR data. In *3rd Malaysian Remote Sensing and GIS Conference and Exhibition, 8-9 April 2002, Kuala Lumpur.*
- Hirano, T., Kusin, K., Limin, S. & Osaki, M.** 2014. Carbon dioxide emissions through oxidative peat decomposition on a burnt tropical peatland. *Glob. Change Biol*, *20*: 555–65
- IPCC.** 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: wetlands. Geneva, Switzerland. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/pdf/Wetlands_Supplement_Entire_Report.pdf
- Jaenicke, J., Enghart, S., & Siegert, F.** 2011. Monitoring the effect of restoration measures in Indonesian peatlands by radar satellite imagery. *Journal of Environmental Management*, *92*(3):630–638.

Kasischke, E. S., Bourgeau-Chavez, L. L., Rober, A. R., Wyatt, K. H., Waddington, J. M. & Turetsky, M. R. 2009. Effects of soil moisture and water depth on ERS SAR backscatter measurements from an Alaskan wetland complex. *Remote Sensing of Environment*, 113:1868–1873.

Ministry of Environment and ForestryKementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2020). State of Indonesia's Forests 2020. Jakarta, Ministry of Environment and Forestry, Republic of Indonesia.

Lamers L.P., Smolders A.J.P. & Roelofs J.G.M. 2002. The restoration of fens in the Netherlands. *Hydrobiologia*, 478:107–130.

Moya, M. M., Koch, M. W., & Hostetler, L. D. 1993. One-class classifier networks for target recognition applications. Online: <https://www.osti.gov/biblio/6755553>

Pasolli, L., Notarnicola, C., Bertoldi, G., Bruzzone, L., Remelgado, R., Greifeneder, F., Niedrist, G., Della Chiesa, S., Tappeiner, U. & Zebisch, M. 2015. Estimation of soil moisture in mountain areas using SVR technique applied to multiscale active radar images at C-band. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(1): 262– 283.

Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D. & Toll, D. 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(3): 381-394.

Sanchez-Hernandez, C., Boyd, D. S., & Foody, G. M. 2007. One-class classification for mapping a specific land-cover class: SVDD classification of fenland. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4): 1061– 1073.

Similä, M., Aapala, K., & Penttinen, J. (eds). 2014. Ecological restoration in drained peatlands. Metsähallitus, Natural Heritage Services. Vantaa, Finland. Online: https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Boreal_Peatland_Best_Practices.pdf

Song, B., Li, P., Li, J., & Plaza, A. 2016. One-class classification of remote sensing images using kernel sparse representation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(4): 1613– 1623.

Taufik, M., Veldhuizenb, A.A., Wösten, J.H.M. & van Lanen, H.A.J. 2019. Exploration of the importance of physical properties of Indonesian peatlands to assess critical groundwater table depths, associated drought, and fire hazard. *Geoderma*, 347: 160–169

Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote sensing of Environment*, 114(1):106–115.

Woodhouse, I. H. 2005. Introduction to microwave remote sensing. CRC press. pp 400

Xu, X., Ji, X., Jiang, J., Yao, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., Yang, H., Shi, Z. & Cheng, T. 2018. Evaluation of one-class support vector classification for mapping the paddy rice planting area in Jiangsu Province of China from Landsat 8 OLI imagery. *Remote Sensing*, 10(4): 546. <https://doi.org/10.3390/rs10040546>

GLOSARIUM

Lahan gambut: adalah jenis lahan basah yang terdapat di hampir seluruh negara, saat ini mencakup 3% dari permukaan tanah dunia. Istilah 'lahan gambut' mengacu kepada tanah gambut dan habitat lahan basah yang tumbuh di atas permukaannya.

Pemantauan lahan gambut: dalam hal ini mengacu pada pengamatan secara reguler dan sistematis dari variabel-variabel khusus dan perubahannya sepanjang waktu, di dalam area lahan gambut yang diketahui. Pemantauan sering kali digunakan untuk memberikan informasi dan memahami bagaimana fungsi dan kondisi lahan gambut terus berkembang dan untuk menilai apakah strategi pengelolaan air, intervensi restorasi berjalan efektif, dan juga risiko kebakaran. Untuk mencapai hasil-hasil ini, pendekatan lanskap yang tepat menjadi hal yang penting.

Pembasahan lahan gambut: tindakan menaikkan rata-rata tinggi muka air tanah agar menjadi sedekat mungkin ke permukaan gambut di seluruh kesatuan lahan gambut, misalnya kesatuan hidrologis gambut yang telah dikeringkan, agar kegiatan-kegiatan seperti budidaya tanaman lahan kering, hutan tanaman dan penggembalaan ternak misalnya, memungkinkan dapat dilakukan. Gambut yang kering bisa saja menjadi terlalu kering dan secara kimiawi tidak sesuai untuk tanaman lahan gambut ([Lamers dkk. 2002](#)). Menaikkan muka air tanah akan membasahi permukaan gambut, menciptakan kondisi yang lebih sesuai untuk rekolonisasi oleh tanaman lahan gambut dan berpotensi memungkinkan terjadinya akumulasi gambut.

Teknik-teknik pembasahan diantaranya menyekat parit drainase atau selokan (dengan menggunakan gambut, batu, sekat plastik atau bendungan kayu), menanam vegetasi yang tahan pada air tergenang di parit-parit untuk memperlambat aliran air, menyekat saluran di bawah tanah atau pipa gambut, membangun tanggul atau meninggikan pematang (gundukan gambut yang memanjang atau barisan bal jerami) untuk menahan air, memasukkan sekat (misalnya bal jerami) di bawah permukaan gambut untuk memperlambat pengeringan di bawah permukaan, mematikan pompa drainase, atau memperbaiki aliran masuk.

Pendekatan lanskap: Pendekatan lanskap dalam kasus lahan gambut berarti, antara lain, mempertimbangkan perubahan tingkat air di seluruh kesatuan hidrologis gambut sebagai satu kesatuan. Ini juga harus mempertimbangkan mata pencaharian masyarakat, interaksi vegetasi, serta dampak dan aktivitas dari berbagai sektor yang berbeda, terkadang berlokasi jauh dari lahan gambut namun berdampak terhadap mereka. Beberapa fitur di lanskap-lanskap tertentu: 1) sektor (misalnya tanaman pangan; perkebunan kelapa sawit; konservasi; ekowisata); 2) pemangku kepentingan (misalnya, mereka yang membuka lahan dengan membakar; pembuat kebijakan; penegak hukum; pelaksana restorasi; pemilik

perkebunan besar; perkebunan rakyat); 3) skala (misalnya, dampak perdagangan minyak sawit global terhadap hubungan kuasa dan sosial hingga ke tingkat lokal); dan juga 4) masalah tata kelola. Untuk pemantauan ekosistem, analisa fitur-fitur ini memungkinkan untuk fokus pada aspek-aspek utama yang berdampak terhadap lanskap lahan gambut.

Restorasi lahan gambut: terutama digunakan untuk merujuk ke restorasi hidrologis, seperti penyekatan kanal dan langkah-langkah pengendalian terkait, yang memungkinkan kembalinya spesies lahan gambut, menghentikan degradasi gambut, dan idealnya, membuat akumulasi gambut terjadi kembali. Restorasi gambut dapat dilakukan pada kelas-kelas yang berbeda untuk mendefinisikan daerah di mana dan restorasi hidrologis atau revegetasi apa yang diperlukan. Revegetasi merupakan suatu kegiatan tambahan yang juga baik dilakukan untuk membantu memulihkan fungsi hidrologis dan membantu mengembalikan beberapa keanekaragaman hayati di area gambut.

Subsidensi: Subsidensi gambut adalah penurunan permukaan gambut yang terjadi setelah penggalian drainase (saluran air). Di tahun-tahun pertama setelah drainase, proses kompresi gambut secara fisik (konsolidasi dan pemadatan) adalah faktor-faktor dominan yang menyebabkan subsidensi. Sebagai akibatnya, hilangnya volume gambut terjadi terutama melalui oksidasi biologi (dan juga kebakaran, di beberapa lokasi) (FAO, 2014).

Terminal: Menu di SEPAL untuk memilih tipe komputer berbasis web atau semacamnya di mana seluruh pemrosesan data dilakukan.

Panduan praktis pemantauan restorasi lahan gambut di Indonesia

Pendekatan penginderaan jauh menggunakan platform FAO-SEPAL

Food and Agriculture Organization of the United Nations

Viale delle Terme di Caracalla, Rome