

Estimasi Area Tergenang Akibat Kenaikan Muka Air Laut Menggunakan Data *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) pada Kawasan Pesisir Teluk Ambon Dalam, Provinsi Maluku, Indonesia (Studi Kasus: Kawasan Pesisir Desa Waiheru)

Theo Imanuel Noya*, Jonson Lumban Gaol, Syamsul Bahri Agus

Program Studi Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor
Jl. Agatis, Kec. Dramaga, Kota Bogor, Jawa Barat, 16128, Indonesia.
Email: imanueltheo@apps.ipb.ac.id

Abstract

Estimation of Potential Flood Areas Due to Sea Level Rise Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in the Inner Ambon Bay Coastal, Maluku Province, Indonesia (Study case: Waiheru Village Coastal)

The estimation model of potential tidal flooding areas in this study was built using altimetry satellite data for the period January 1993–July 2023, tidal data of Teluk Ambon Dalam (TAD) for the period 2012–2018, and Digital Terrain Model (DTM) data or land surface height recorded by the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) DJI Mavic 2 Pro series. Satellite altimetry and tidal data were used to calculate the estimated values of the tidal flood inundation height in 2023 and 2050 under the highest tide conditions. UAV data recording was carried out at two variations of flight height, namely 80 m and 100 m, to determine the accuracy of the best geometry to be used in modeling. The bathtub-method approach was used to model the potentially inundated area by integrating the estimated inundation heights and DTM values. The results of the analysis of altimetry satellite data for the period 1993–2023 showed that the value of the sea level rise rate of Ambon Bay waters is 4 mm/year. The estimated value of tidal flood inundation extent in 2050 is 1.40 m. The flying height of 100 produces better geometry accuracy with a horizontal accuracy value of 1.51 m and vertical accuracy of 0.61 m at a scale of 1:5.000. Land elevation contours in the study area based on DTM data ranged from 0.12 - 1.82 m. Modeling results estimated that the inundated area in the study area in 2023 was 0.46 m and increased to 0.50 ha in 2050 due to sea level rise.

Keywords: Inner Ambon Bay Coast, SLR, UAV, DTM & Tidal Flood.

Abstrak

Model estimasi area berpotensi tergenang banjir rob pada penelitian ini dibangun dengan menggunakan data satelit altimetri periode Januari 1993 – Juli 2023, data pasang-surut Teluk Ambon Dalam periode tahun 2012 - 2018 dan data *Digital Terrain Model* (DTM) atau ketinggian permukaan tanah hasil perekaman *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) seri DJI Mavic 2 Pro. Data satelit altimetri dan data pasang-surut digunakan untuk menghitung nilai estimasi tinggi genangan banjir rob pada tahun 2023 dan 2050 saat kondisi pasang tertinggi. Perekaman data UAV dilakukan pada 2 variasi ketinggian terbang yakni 80 m dan 100 m untuk menentukan ketelitian geometri terbaik yang akan digunakan pada pemodelan. Pendekatan *bathtub-method* digunakan untuk memodelkan area berpotensi tergenang, yakni dengan mengintegrasikan nilai estimasi tinggi genangan dan nilai DTM. Hasil analisis data satelit altimetri periode tahun 1993 - 2023 memperoleh nilai laju kenaikan muka air laut perairan Teluk Ambon adalah 4 mm/tahun. Nilai estimasi jangkauan genangan banjir rob pada tahun 2050 adalah 1,40 m. Ketinggian terbang 100 menghasilkan ketelitian geometri yang lebih baik dengan nilai ketelitian horizontal adalah 1,51 m dan vertikal adalah 0,61 m pada skala 1:5.000. Kontur ketinggian tanah pada kawasan penelitian berdasarkan data DTM berkisar antara 0,12 – 1,82 m. Hasil pemodelan estimasi area tergenang pada kawasan penelitian tahun 2023 adalah seluas 0,46 m dan bertambah menjadi 0,50 ha pada tahun 2050 akibat kenaikan muka laut.

Kata Kunci: Pesisir TAD, SLR, UAV, DTM & banjir rob.

PENDAHULUAN

Pemanasan global merupakan fenomena peningkatan suhu rata-rata atmosfer dan permukaan laut secara global (Allen *et al.*, 2018). Pada periode tahun 1900 – 2000 telah terjadi peningkatan suhu global sebesar 0,7 – 1°C yang menyebabkan mencairnya lapisan es pada wilayah kutub, sehingga berdampak terhadap naiknya rata-rata muka laut atau *Sea Level Rise* (SLR) (Griggs & Reguero, 2021). Kajian yang dilakukan oleh Church & White (2011), Oppenheimer *et al.*, (2019), dan Jia *et al.*, (2022) menyatakan bahwa telah terjadi kenaikan muka laut global dengan

nilai secara berturut-turut sebesar $3,2\pm 0,4$ mm/tahun, 3,6 mm/tahun, dan 3,3 mm/tahun. Pada perairan Indonesia, hasil kajian Nababan *et al.*, (2015) dan Handoko *et al.*, (2019) menyatakan bahwa nilai laju SLR secara berturut-turut sebesar, 5,84 mm/tahun dan 4,5 mm/tahun. Sedangkan pada perairan Teluk Ambon, hasil Kajian Rahman *et al.*, (2020) menyatakan bahwa nilai laju SLR pada perairan tersebut adalah 5,5 mm/tahun. Hasil kajian-kajian tersebut menunjukkan bahwa nilai laju kenaikan muka laut pada perairan Indonesia hampir dua kali lipat dibandingkan dengan perairan global (Nababan *et al.*, 2015).

Terjadinya kenaikan muka air laut menjadi ancaman karena berpotensi menyebabkan meningkatnya intensitas genangan banjir rob pada kawasan pesisir di Indonesia (Lumban-Gaol *et al.*, 2017; El-fath *et al.*, 2022; Hidayah *et al.*, 2023) termasuk kawasan pesisir Teluk Ambon Dalam (TAD). Banjir rob merupakan genangan air laut pada kawasan pesisir saat terjadi pasang air laut maupun saat terjadi badai (Fandé *et al.*, 2022). Kenaikan muka air laut juga dapat menyebabkan abrasi, perubahan garis pantai secara permanen maupun kerusakan habitat pada kawasan pesisir (Wuriatmo *et al.*, 2012; Lumban-Gaol *et al.*, 2017). Berbagai ancaman akibat kenaikan muka laut mengindikasikan pentingnya dilakukan pengamatan kenaikan muka laut (Adebisi *et al.*, 2021) serta pemodelan estimasi sebaran dan luasan area yang berpotensi tergenang banjir rob pada kawasan pesisir sebagai upaya mitigasi terhadap ancaman kenaikan muka laut pada kawasan pesisir Teluk Ambon Dalam.

Estimasi sebaran dan luasan area berpotensi tergenang banjir rob dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan metode pemodelan (Nirwansyah & Braun, 2019; Tegos *et al.*, 2023; Nederhoff *et al.*, 2024) yang salah satunya adalah pendekatan bathtub-method (López-Dóriga & Jiménez, 2020; Shen *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2023). Metode ini mempertimbangkan faktor nilai laju SLR dan faktor ketinggian permukaan tanah kawasan pesisir, dengan mengasumsikan bahwa kawasan pesisir yang terhubung dengan laut serta lebih rendah dari nilai estimasi tinggi genangan akan tergenang (Carneiro-Barros *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2024). Faktor ketinggian permukaan tanah kawasan pesisir sangat penting karena mempengaruhi jangkauan dan sebaran genangan banjir rob ke daratan, maupun menjabarkan pola aliran banjir rob (Sutrisno *et al.*, 2020; Imani *et al.*, 2021).

Survei lapang dengan metode konvensional untuk memperoleh data ketinggian tanah seperti menggunakan *total station* membutuhkan biaya, waktu dan tenaga yang cukup besar serta memiliki keterbatasan dalam pergerakan pada kawasan urban (Devoto *et al.*, 2020; Ahmed *et al.*, 2022). Data *Digital Elevation Model* (DEM) atau peta ketinggian saat ini tersedia dari berbagai sumber data sekunder namun memiliki keterbatasan resolusi dan kendala teknis pengaplikasian. Keterbatasan resolusi pada data DEM seperti data yang tersedia memiliki resolusi spasial menengah sehingga terbatas dalam menampilkan detail kontur ketinggian tanah maupun data DEM yang tersedia memiliki resolusi temporal periode waktu lampau sehingga menjadi tidak representatif dengan kondisi saat ini. Kendala teknis pada data DEM yang tersedia saat ini adalah masih mengandung objek tutupan lahan sehingga menjadi permasalahan karena dapat menyebabkan bias dalam mengestimasi sebaran dan perhitungan luas genangan (Yunus *et al.*, 2016; Notti *et al.*, 2018; Al-Nasrawi *et al.*, 2021).

Solusi untuk menghasilkan peta DEM secara efisien adalah dengan pemanfaatan teknik *photogrammetry* dengan menggunakan *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) atau *drone* (Sze *et al.*, 2015; Jiménez *et al.*, 2021; Cirillo *et al.*, 2024). UAV adalah pesawat tanpa awak yang dikendalikan dari jarak jauh yang dilengkapi dengan kamera, dan berbagai sistem dan sensor pada komponen *Inertial Measurement Unit* (IMU) seperti teknologi *Global Positioning System* (GPS) dan pengukuran ketinggian terbang yang dapat digunakan pada survei pemetaan termasuk pemetaan ketinggian tanah (Udin *et al.*, 2012; Kršák *et al.*, 2016). Penggunaan UAV dapat menghasilkan produk berupa citra tutupan lahan maupun citra *Digital Elevation Model* (DEM) atau model ketinggian permukaan yang masih mengandung tutupan lahan yang dapat diekstrak menjadi data *Digital Terrain Model* (DTM) atau ketinggian permukaan tanah tanpa tutupan lahan yang detail, terbaru dan akurat secara geometris (Jiménez *et al.*, 2021; Pessacg *et al.*, 2022). Kemampuan UAV tersebut dapat

dimanfaatkan untuk menghasilkan data ketinggian permukaan tanah pada kawasan pesisir untuk mengestimasi kawasan berpotensi tergenang banjir rob (Popescu *et al.*, 2017; Shen *et al.*, 2022; Gâlgău *et al.*, 2023; Carneiro-Barros *et al.*, 2023)

Pengaplikasian teknik *photogrammetry* untuk menghasilkan data DTM yang digunakan dalam pemodelan kawasan estimasi tergenang banjir rob relatif baru dan belum banyak diaplikasikan di Indonesia. Penelitian ini penting dilakukan karena mengkaji penggunaan UAV sebagai alternatif penyediaan data DTM yang lebih efisien serta mengaplikasikan penggunaan UAV dalam menghasilkan data DTM untuk pemodelan estimasi kawasan berpotensi tergenang akibat kenaikan muka air laut pada kawasan pesisir TAD sebagai bahan pertimbangan pengelolaan jangka panjang kawasan pesisir TAD.

MATERI DAN METODE

Penelitian dilakukan pada kawasan pesisir Desa Waiheru, Teluk Ambon Dalam (gambar 1). Prosedur pengambilan data lapangan terdiri dari: Pengukuran data koordinat dan ketinggian tanah pada titik kontrol tanah (TKT) yang terbagi menjadi titik *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Control Point* (ICP), dengan menggunakan perangkat GPS tipe Geodetik. Penentuan sebaran TKT mengacu pada PerBIG No.1 tahun 2020, SNI 19-672-2002, dan SNI 8202-2019 sebagai berikut: a.) TKT tersebar merata pada area penelitian dan mewakili tiap zona ketinggian yang berbeda, b.) Jarak antar TKT adalah minimal 10% panjang diagonal kawasan penelitian, c.) Area peletakan TKT bebas dari tutupan vegetasi serta diletakan pada permukaan tanah, d.) TKT dapat terlihat pada hasil foto udara, e.) Area peletakan TKT memiliki pandangan langit yang bebas sebesar 15° ke segala arah, f. Area TKT tidak terlalu dekat dengan objek yang menyebabkan efek *multipath*.

Pengukuran data GPS Geodetik pada TKT dilakukan dengan model diferensial (Abidin., 2021) yang menggunakan dua perangkat GPS tipe geodetik yakni perangkat Trimble NetR9 pada base *reference station* dan perangkat rover Stonex pada titik ukur TKT. Base dihubungkan dengan Jaring Ikat Dasar Nasional yakni stasiun CORS (*Continuously Operating Reference Station*) Ambon. Data dikoleksi menggunakan metode *Rapid Static* dengan lama waktu perekaman 20 menit (SNI 19-672-2002). Data TKT yang telah diakuisisi selanjutnya dilakukan *post-processing* dengan data CORS Ambon (CAMB) dengan menggunakan *software* Cube-Manager. Proses tersebut menghasilkan nilai koordinat dan tinggi permukaan tanah dari ellipsoid (N) yang telah tereferensi. Pengambilan data serta pengolahan data TKT tersebut dilakukan oleh Balai Pemantapan Kawasan Hutan (BPHK) Wilayah IX Ambon. Nilai ketinggian tanah dari ellipsoid selanjutnya dilakukan undulasi geoid untuk memperoleh nilai ketinggian tanah ortometrik (h) pada situs <https://srgi.big.go.id>. Hasil undulasi geoid akan dilakukan interpolasi dengan menggunakan metode *Spline* untuk menghasilkan sebaran kontur ketinggian permukaan tanah hasil pengukuran lapangan.

Data perekaman foto udara UAV menggunakan perangkat wahana DJI Mavic 2 Pro dan *software* Drone Deploy. Pemilihan ketinggian terbang UAV perlu diperhatikan karena berpengaruh terhadap akurasi geometri (Gunawan *et al.*, 2019). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada seri Mavic 2 Pro, belum ditentukan korelasi ketinggian terbang dengan akurasi geometri yang dihasilkan (Mugnai & Tucci, 2022). Penelitian oleh Ahmed *et al.*, (2022), Pessacg *et al.*, (2022), dan Cirillo *et al.*, (2024) menggunakan ketinggian terbang yang bervariasi yakni 60 m, 50 m dan 100 m. Pada penelitian ini, UAV diterbangkan pada 2 ketinggian terbang yakni 80 m dan 100 m yang disesuaikan dengan izin penerbangan dan untuk menghindari objek tinggi. Ketinggian terbang yang memiliki ketelitian vertikal (z) terbaik akan digunakan dalam pemodelan. Perekaman foto udara dilakukan dengan kombinasi sudut (Ahmed *et al.*, 2022) yakni 90° membentuk grid dan 70° pada sisi perimeter. Rancangan *overlap: frontlap* sebesar 80% dan *sidelap* sebesar 80%.

Pengolahan data UAV dilakukan menggunakan *software* Agisoft Metashape dengan tahapan yang mengacu pada Jiménez *et al.*, (2021) dan Ahmed *et al.*, (2022). Proses pengolahan

data diawali dengan melakukan input foto udara berdasarkan ketinggian terbang kemudian dilanjutkan dengan proses (1) *align photo* setelah itu dilakukan (2) koreksi geometrik dengan menggunakan titik-titik GCP, dimana ketinggian terbang yang menghasilkan nilai geometri terbaik akan digunakan pada pemodelan, (3) *build point clouds*, (4) *build mesh*, (5) *build DEM*, dan (6) *build orthomosaic*. Hasil pengolahan data UAV adalah citra ortofoto dan citra DEM yang ditampilkan dalam bentuk peta. Perhitungan skala foto udara dilakukan menggunakan persamaan: (Suyudi & Subroto, 2014)

$$\text{Skala} = \frac{f}{H}$$

Keterangan: H = Tinggi terbang rata-rata (m); f = focal length kamera (mm).

Uji geometri dilakukan pada setiap titik ICP dengan menghitung nilai *root mean square error* (RMSE) untuk mendapatkan tingkat kepercayaan peta 90% *Circular Error* (CE90) dan *Linear Error* (LE90) yang mengacu pada Perka BIG No.15 Tahun 2014. Hasil perhitungan uji geometri kemudian diklasifikasikan menurut Perka BIG No.6 Tahun 2018 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar.

RMSEr horizontal:

$$D^2 = \sqrt{\frac{D[(xdata-xcek)^2 + D[(ydata-ycek)^2]}{n]}{n}}$$

RMSEz vertikal:

$$= \sqrt{\frac{(ZDTM-Zcek)^2}{n}}$$

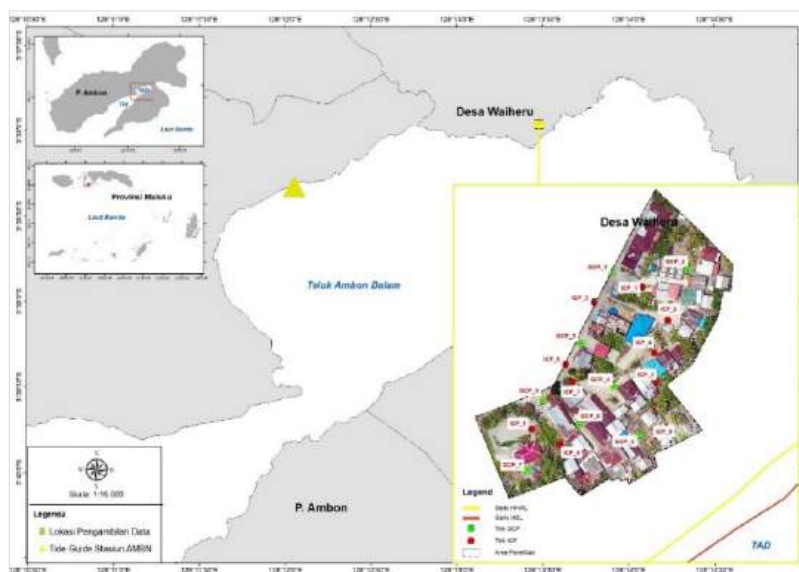
Keterangan: n = Jumlah titik cek; D = Selisih antara koordinat lapangan dengan koordinat pada foto; x = Nilai koordinat sumbu x; y = Nilai koordinat sumbu Y; z = Nilai ketinggian permukaan tanah (H).

Nilai CE90 dan LE90 kemudian dihitung berdasarkan rumus:

$$CE90 = 1,5175 \times RMSEr$$

$$LE90 = 1,6499 \times RMSEz$$

Ekstraksi data DTM dilakukan menggunakan metode *random sampling point*, yakni dengan menentukan titik-titik permukaan tanah, ekstraksi data x, y, z tiap titik, dan interpolasi data dengan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) untuk menampilkan kontur DTM menggunakan software arcGIS 10.7.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian pada kawasan pesisir Desa Waiheru, Teluk Ambon Dalam.

Nilai laju SLR dihitung dengan menggunakan data perekaman satelit altimetri periode Januari 1993 – Juli 2023 yang diunduh pada <https://marine.copernicus.eu>. Analisis nilai laju kenaikan muka air laut dilakukan dengan menggunakan metode regresi linear (ICCSR, 2010; Doran *et al.*, 2015; Ariana *et al.*, 2017) untuk memperoleh persamaan regresi linier yang akan digunakan untuk menghitung nilai laju SLR menggunakan persamaan (Cahyadi *et al.*, 2016; Ariana *et al.*, 2017):

$$\text{Laju kenaikan muka air laut} = \frac{(y_{\max} - y_{\min})}{\text{Total bulan pengamatan}}$$

Data pasut yang digunakan diunduh pada situs <https://uhslc.soest.hawaii.edu/> (Long; Lat: 128.183E; -3.683S) periode tahun 2012 – 2018. Pengolahan data pasut menggunakan program *WorldTide & WorldCurrent* 2010 untuk memperoleh nilai amplitudo (A) dari 9 komponen harmonik pasut (M_2 , S_2 , O_1 , K_1 , P_1 , N_2 , K_2 , M_4 , dan MS_4) dan nilai S_0 (MSL) (Mutiara & Muhiddin, 2015). Nilai-nilai amplitudo akan digunakan untuk menentukan nilai *Highest High-Water Level* (HHWL) atau pasang tertinggi menggunakan persamaan: (ICSM PCTMS (2011).

$$\text{Highest High Water Level} = S_0 + M_2 + S_2 + K_1 + O_1 + N_2 + K_2 + P_1$$

Tinggi genangan tahun 2018 dan Estimasi tinggi genangan banjir rob tahun 2023 dan 2050 dihitung dengan menggunakan persamaan (Ginanjari *et al.*, 2019):

$$\text{Genangan } t_0: \text{HHWL}_{2018} - \text{MSL}_{2018}$$

$$\text{Genangan } t_1: \text{Tinggi genangan tahun 2018} + (\text{nilai laju SLR} \times (t_1 - t_0))$$

Model genangan banjir rob dilakukan dengan pendekatan *bathub-method* dengan menggunakan *software arcGIS* 10.7 dengan algoritma:

$$= \text{DTM} - (\text{nilai laju SLR} \times (t_0 - t_1) + \text{tinggi genangan } t_0)$$

Keterangan: Keterangan: SLR = Sea Level Rise; t_1 = tahun prediksi (2023 dan 2050); t_0 = tahun 2018.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kawasan penelitian Desa Waiheru memiliki luas 1,2 ha dan terdapat 17 TKT yang terdiri dari 8 titik GCP dan 9 titik ICP. Selang nilai ketinggian permukaan tanah hasil pengukuran lapangan berkisar dari 0,61 m hingga 2,01 m dengan rata-rata 1,18 m. Selang nilai ketinggian tanah hasil interpolasi berkisar antara 0,5 – 2,01 m, dengan pola peningkatan nilai ketinggian tanah dari area dekat garis pantai ke arah darat. Area dengan nilai ketinggian tanah < 1 m dominan tersebar pada bagian timur – tenggara – selatan dan barat daya kawasan penelitian. Permukaan tanah kemudian mengalami pertambahan ketinggian hingga nilai tertinggi pada area barat laut – utara kawasan yang merupakan area jalan penghubung Desa Waiheru. Pola sebaran ketinggian tanah pada kawasan Desa Waiheru yang dapat diamati pada profil transek A – B, pada titik awal transek adalah 0,52 m kemudian mengalami pertambahan nilai ketinggian hingga mencapai nilai 0,75 m pada jarak 50 m. Pada jarak 80,00 m ketinggian tanah mencapai nilai 1,00 m kemudian terus mengalami pertambahan hingga akhir transek nilai dengan nilai 1,62 m. Sebaran TKT, sebaran ketinggian permukaan tanah, dan profil ketinggian permukaan tanah ditampilkan pada Gambar 2.

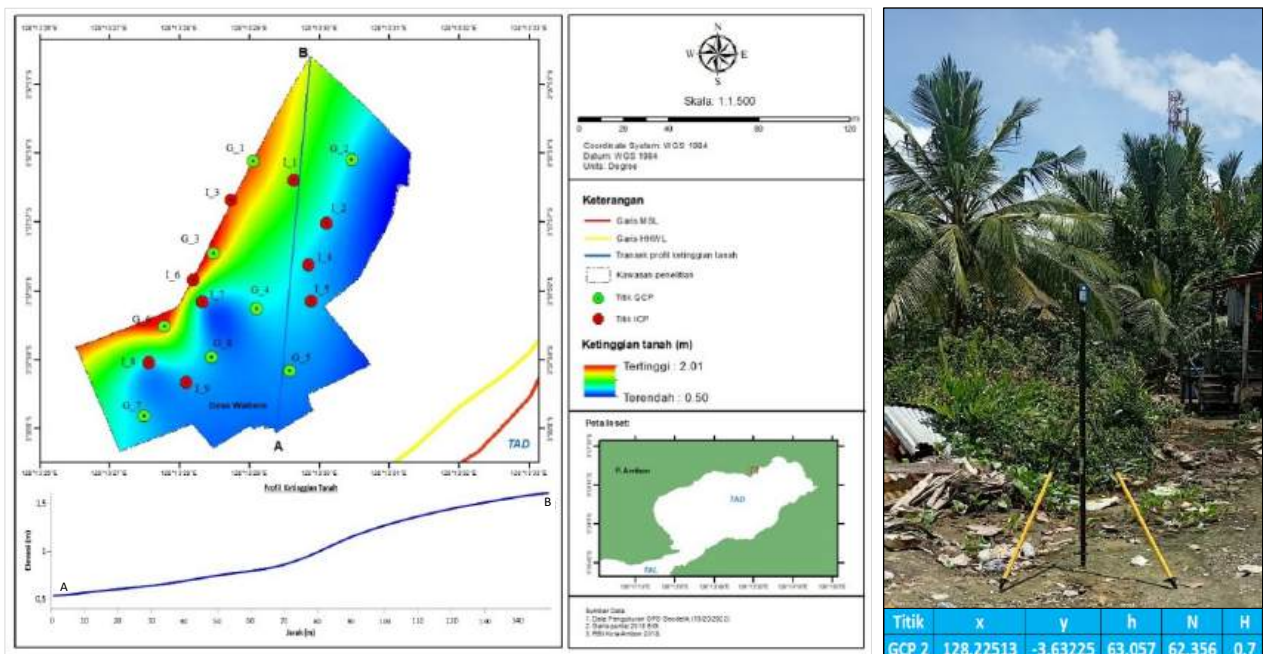
Hasil koreksi geometri pada titik-titik GCP citra pada ketinggian terbang 80 dan 100 m menghasilkan nilai RMSE_x secara berturut-turut sebesar 0,95 dan 0,79 sedangkan nilai RMSE_y sebesar 0,26 dan 0,25. Pada parameter vertikal, nilai RMSE_z lebih besar dihasilkan pada ketinggian terbang 80 m dengan nilai 0,71 dibandingkan ketinggian 100 m yang menghasilkan nilai 0,31 (Gambar 3). Nilai pergeseran horizontal (x, y) dan vertikal (z) berdasarkan ketinggian terbang ditampilkan pada Tabel 1.

Hasil koreksi geometri citra ketinggian terbang 80 m mengalami pergeseran horizontal sebesar 1,48 m dan pergeseran vertikal sebesar 1,17 m sedangkan citra ketinggian terbang 100 m mengalami pergeseran horizontal sebesar 1,25 m dan pergeseran vertikal sebesar 0,51 m. Jika dibandingkan dengan penelitian yang menggunakan seri UAV yang sama, Mugnai & Tucci, (2022) yang mengkaji pengaruh ketinggian terbang terhadap kondisi geometri dengan variasi ketinggian terbang 30, 45, 60 dan 80 m, memperoleh nilai pergeseran horizontal berkisar antara 0,037 – 0,230 m sedangkan pergeseran vertikal berkisar antara 0,024 – 0,050 m. Sedangkan Ahmed *et al.*, (2022) mengkaji pengaruh sudut perekaman terhadap kondisi geometri dengan menggunakan 4 skenario terbang dengan konfigurasi kombinasi sudut perekaman 90° dan 70°, diperoleh nilai pergeseran x yang berkisar 0,007 – 0,074 m, pergeseran y berkisar 0,017 – 0,125 m dan pergeseran z berkisar 0,022 – 0,107 m. Kedua penelitian tersebut menghasilkan nilai pergeseran geometri yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan hasil pada penelitian ini. Namun pada kedua penelitian tersebut hanya mengkaji satu faktor yang dapat mempengaruhi kondisi geometri hasil perekaman UAV. Pada penelitian ini, dikaji pengaruh ketinggian terbang dan kombinasi sudut perekaman ortogonal pada alur terbang *longitudinal* dan *transversal* serta sudut 70° pada alur parameter dalam upaya menghasilkan model geometris yang lebih baik terutama pada kondisi survei urban kawasan pesisir yang memiliki kendala berupa persebaran titik kontrol tanah yang terbatas dan tutupan lahan yang beragam (Manfreda *et al.*, 2019). Nilai ketelitian dan kelas peta lebih lanjut akan ditentukan pada proses uji geometri.

Error geometri pada penelitian ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor yakni a.) faktor *displacement*, b.) faktor penggunaan kombinasi sudut perekaman, dan c.) faktor konfigurasi saat proses perancangan penerbangan dan perekaman data UAV, serta saat pengolahan data UAV.

Tabel 1. Nilai pergeseran Geometri Hasil Koreksi Geometri.

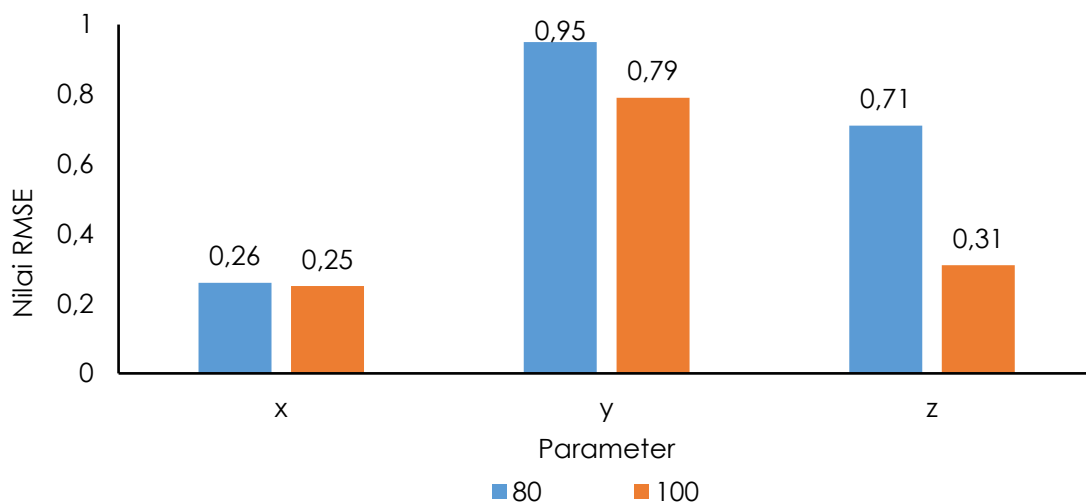
Ketinggian Terbang	Horizontal (m)	Vertikal (m)
80 m	1,48	1,17
100 m	1,25	0,51



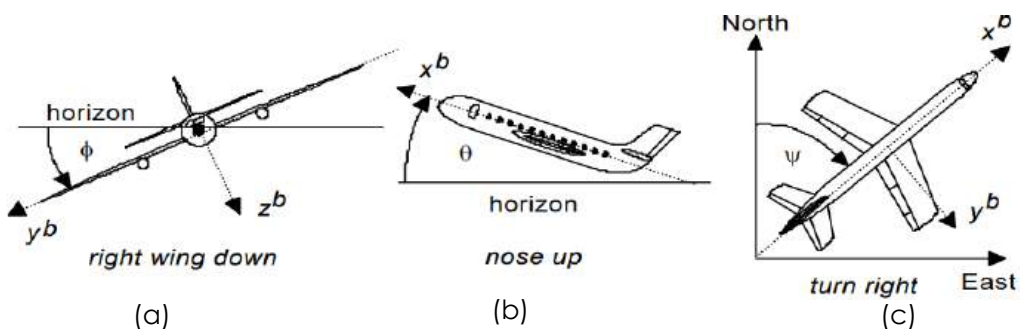
Gambar 2. Sebaran ketinggian permukaan tanah hasil pengukuran lapang, profil ketinggian permukaan tanah dan pengukuran rover di lapang.

Faktor *displacement* atau pergeseran merupakan distorsi akibat adanya pergerakan wahana saat melakukan perekaman (Gambar 4) dapat disebabkan oleh pengaruh angin. Pergerakan wahana dapat berupa terjadinya (1) *lift* atau pergerakan naik-turun ketinggian terbang UAV sehingga mengakibatkan terjadinya perbedaan skala foto, (2) *roll* atau pergerakan wahana yang menyebabkan foto berorientasi pada sumbu x, (3) *yaw* yakni wahana miring ke kanan/kiri yang menyebabkan foto berorientasi pada sumbu z, (4) *tip* atau wahana miring ke depan/belakang yang menyebabkan foto berorientasi pada sumbu y, maupun (5) *drift* atau penyimpangan jalur terbang (Wolf, 1983; Gularso *et al.*, 2013). Pergerakan wahana terjadi saat perekaman foto udara pada kedua ketinggian terbang namun lebih banyak terjadi pada ketinggian terbang 80 m. Contoh pergerakan wahana pada ketinggian terbang 80 m adalah pergerakan naik wahana hingga ketinggian 93,6 m pada saat perekaman sekitar area GCP 5 (Gambar 5). Hal tersebut tentu berpengaruh terhadap perbedaan skala foto dan kondisi geometri citra yang dihasilkan.

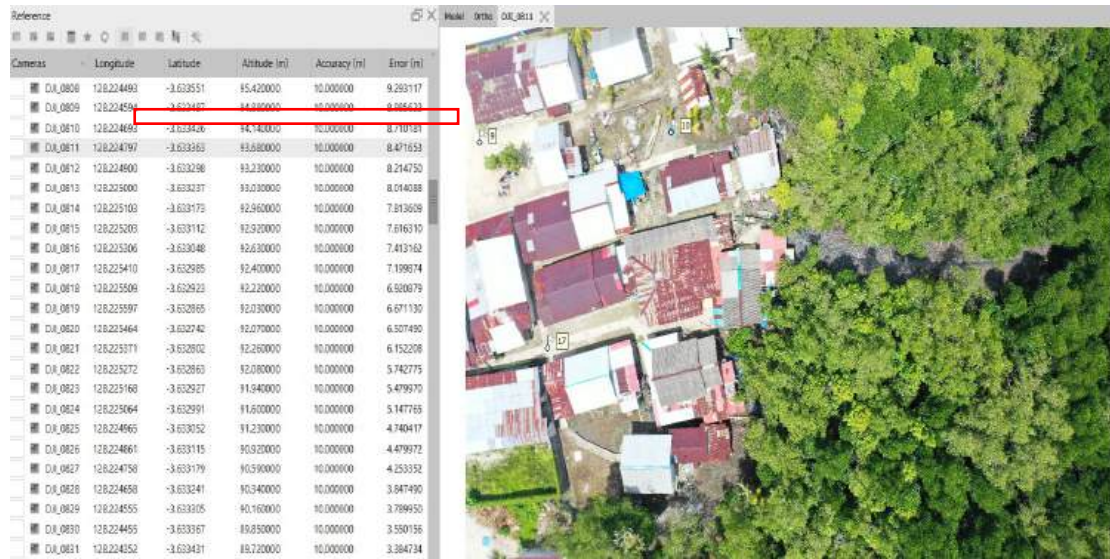
Sudut perekaman data juga dapat menyebabkan error karena dapat mengakibatkan perbedaan skala foto yang dihasilkan (Suyudi & Subroto, 2014). Hal tersebut mengakibatkan terjadinya pergeseran piksel suatu gambar karena tertarik atau merenggang dari posisi awalnya (Amrullah *et al.*, 2016). Penerbangan UAV dan kenampakan hasil foto udara berdasarkan sudut perekaman (ketinggian terbang 80 m) ditampilkan pada Gambar 6. Faktor penting yang perlu dikaji lebih lanjut dalam upaya mengurangi error geometri yang dihasilkan pada penelitian ini adalah desain alur penerbangan (Ahmed *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2023), pola terbang UAV (Mueller *et al.*, 2023), penggunaan variasi sudut perekaman lain (Ahmed *et al.*, 2022; Manfreda *et al.*, 2019), variasi nilai overlap (*side lap* dan *front lap*) (Chaudry *et al.*, 2020), perbandingan variasi seri UAV yang digunakan (Mugnai & Tucci, 2022) maupun perangkat lunak dan proses pengolahan data yang digunakan (Uysal *et al.*, 2015). Secara utuh, proses perencanaan penerbangan, dan post-processing data yang tepat dapat meningkatkan akurasi (Liu *et al.*, 2022).



Gambar 3. Hasil Koreksi geometri Titik CGP Desa Waiheru.



Gambar 4. (a) roll, (b) tip, (c) yaw (Bäumker & Heimes F, 2001).



Gambar 5. Pergerakan perubahan ketinggian terbang pada kode foto DJI_0811.



Gambar 6. (a) Penerbangan UAV, (b) sudut perekaman 90°, (c) 70°.

Nilai RMSEz yang lebih kecil dihasilkan pada ketinggian terbang 100 m. Hal tersebut dipengaruhi oleh terjadinya pergeseran relief, yakni pergeseran posisi dari suatu titik di atas foto yang disebabkan oleh ketinggian objek tersebut diatas suatu bidang datum. Pergeseran relief semakin besar pada area perimeter dari suatu foto dan juga pada ketinggian terbang yang rendah (Suyudi & Subroto, 2014). Pertambahan ketinggian terbang juga menambah jumlah titik GCP yang terekam pada bagian tengah maupun ujung foto sehingga menurunkan nilai kesalahan geometri (Santana et al., 2021). Koreksi geometri menghasilkan nilai RMSEr dan RMSEz yang lebih kecil pada citra ketinggian terbang 100 m sehingga citra tersebut akan dilakukan dalam proses uji geometri dan digunakan dalam pemodelan.

Citra yang dihasilkan selanjutnya dilakukan uji geometri untuk menentukan ketelitian horizontal dan vertikal (Tabel 2) serta kelas ketelitian peta berdasarkan klasifikasi PerKa BIG No.6 Tahun 2018. Hasil uji geometri menghasilkan nilai RMSEx sebesar 0,26 dan RMSEy sebesar 0,96. Kedua nilai tersebut menghasilkan nilai RMSEr sebesar 0,99. Nilai RMSEz yang diperoleh adalah 0,37. Pada penelitian ini diperoleh nilai akurasi vertikal yang lebih baik dibandingkan akurasi horizontal.

Tabel 2. Nilai CE90 dan LE90

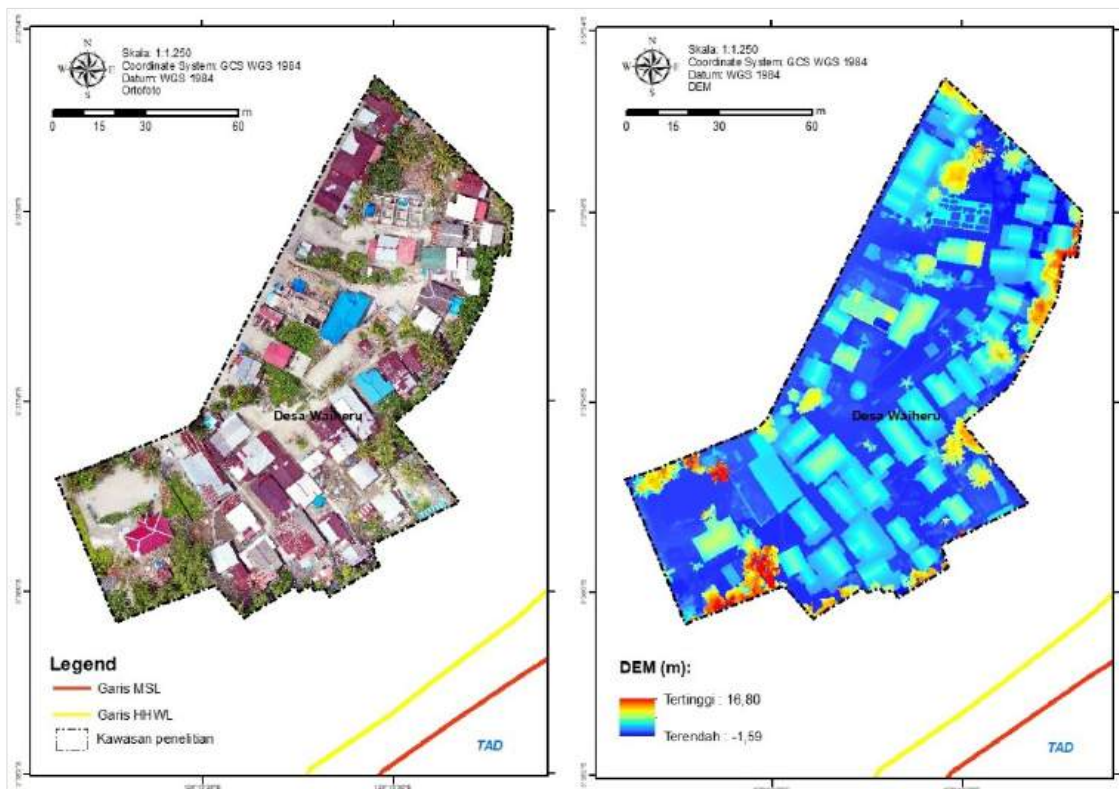
Ketinggian Terbang	CE90	LE90
100 m	1,51	0,61

Penggunaan UAV dengan ketinggian terbang 100 m menghasilkan peta dengan ketelitian horizontal sebesar 1,51 meter dan ketelitian vertikal sebesar 0,61 meter. Kelas ketelitian peta adalah ketelitian horizontal kelas 2 dan ketelitian vertikal kelas 1 pada skala 1:5.000 berdasarkan klasifikasi PerKa BIG No.6 Tahun 2018.

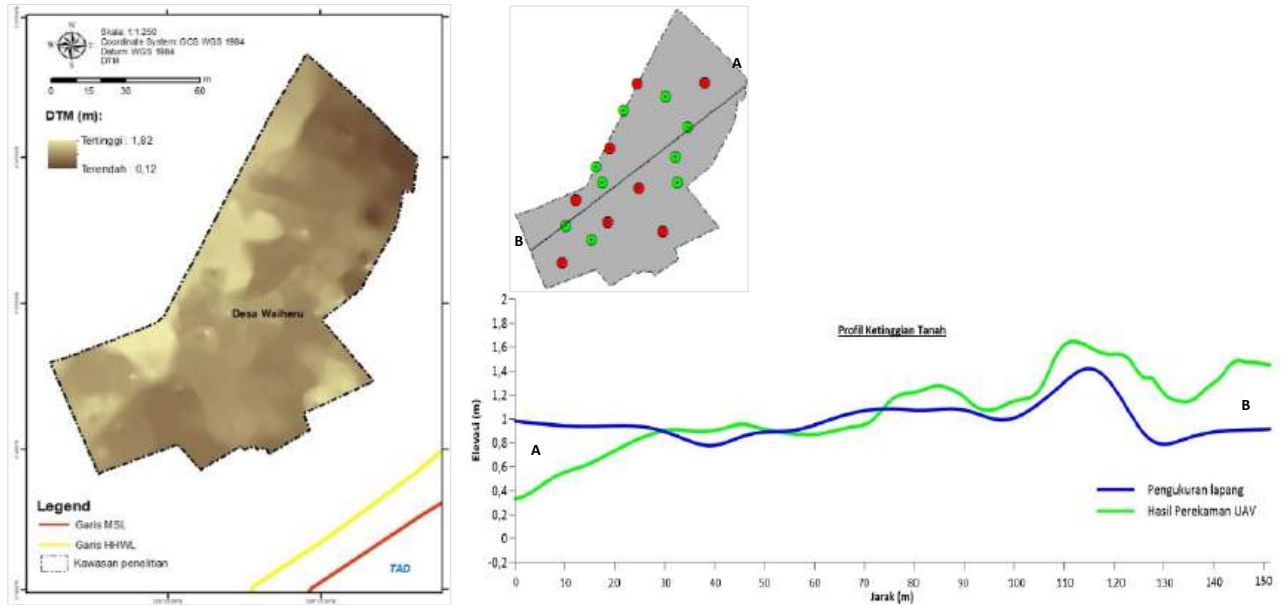
Citra ortofoto dan DEM ketinggian terbang 100 m menghasilkan nilai skala peta 1:3.571 yang diklasifikasikan pada Ketelitian Peta Dasar Rupa Bumi Indonesia (RBI) menjadi skala 1:5.000 (*downscale*) berdasarkan PerKa BIG No.6 tahun 2018. Nilai *Ground Sample Distance* (GSD) atau ukuran piksel citra ortofoto yang dihasilkan adalah 2,56 cm sedangkan nilai GSD pada citra DEM adalah sebesar 5,11 cm. Pada citra ortofoto, dapat diamati jumlah bangunan pada kawasan penelitian yang berjumlah 45 unit dengan total luasan ±4355,87 m² serta panjang ruas jalan ±175,13 m. Selang nilai ketinggian DEM yang dihasilkan adalah 0,12–19,44 m. Peta ortofoto dan peta DEM ditampilkan pada Gambar 7.

Jumlah *random point* DTM pada kawasan penelitian adalah 1983 titik. Ekstraksi data DEM menjadi data DTM pada titik-titik tersebut menghasilkan selang ketinggian tanah yang berkisar dari 0,12 – 1,82 m dengan sebaran berdasarkan hasil interpolasi serta profil ketinggian transek DTM yang ditampilkan pada Gambar 8. Sebaran ketinggian tanah yang rendah terdapat pada area timur laut hingga barat daya kawasan penelitian sedangkan kawasan yang relatif lebih tinggi tersebar pada area barat hingga utara kawasan penelitian.

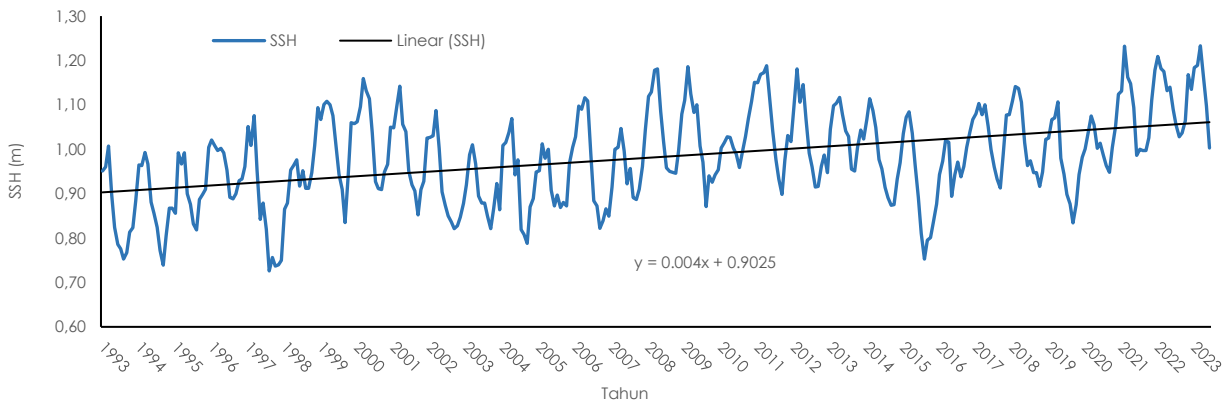
Pada titik awal transek, data DTM menghasilkan ketinggian tanah dengan nilai 0,33 m sedangkan hasil pengukuran lapang adalah 0,97 m. Pada jarak 0 – 35 m transek, data DTM menghasilkan selang nilai ketinggian tanah yang berkisar 0,33 – 0,96 m dengan rata-rata 0,69 m. Hasil pengukuran lapang menghasilkan selang nilai ketinggian permukaan tanah yang berkisar 0,82 – 0,97 m dengan rata-rata 0,93 m. Selisih nilai rata-rata antara data DTM dan pengukuran lapang pada jarak tersebut adalah 0,24 m.



Gambar 7. Citra Ortofoto (kiri), Citra DEM (kanan).



Gambar 8. Sebaran Kontur dan profil ketinggian permukaan tanah.



Gambar 9. Grafik regresi kenaikan muka laut perairan Teluk Ambon pada periode tahun 1993 – 2023.

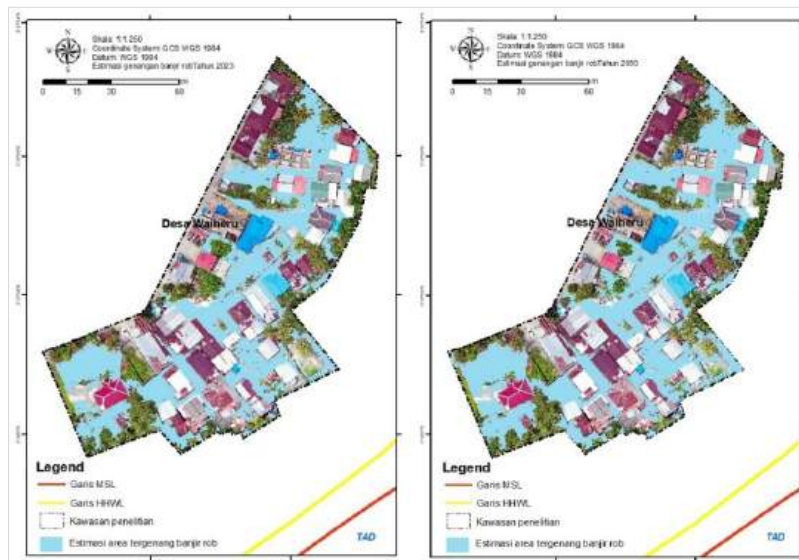
Pada selang jarak transek 35–75 m, data DTM menghasilkan selang nilai ketinggian tanah yang berkisar antara 0,83–1,03 m dengan rata-rata 0,90 m, sedangkan hasil pengukuran lapang menghasilkan selang nilai ketinggian tanah yang berkisar 0,76–1,08 m dengan rata-rata 0,92 m. Selisih nilai rata-rata antara kedua data adalah 0,02 m. Pada selang jarak 75 m hingga akhir transek, data DTM menghasilkan selang nilai 0,93–1,69 m dengan rata-rata 1,31 m, sedangkan pengukuran lapang menghasilkan selang nilai berkisar 0,76–1,45 m dengan rata-rata 1,04 m. Selisih nilai rata-rata pada jarak tersebut adalah 0,27 m. Secara keseluruhan, data DTM menghasilkan selang nilai ketinggian tanah yang berkisar antara 0,33–1,69 m dengan rata-rata 1,08 m, sedangkan pengukuran lapang menghasilkan selang yang berkisar 0,76–1,45 m dengan rata-rata 0,99 m.

Hasil analisa data perekaman satelit altimetri periode tahun 1993–2023 (Gambar 9) diperoleh tren berupa kenaikan muka air laut dengan nilai laju SLR 4 mm/tahun. Hasil pengolahan data pasut perairan TAD memperoleh rata-rata nilai MSL periode tahun 2012–2018 adalah 1,57 m sedangkan rata-rata nilai HHWL yang diperoleh adalah 2,85 m. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, ketinggian genangan pada kondisi HHWL di tahun 2018 adalah 1,28 m. Estimasi nilai tinggi genangan rob saat kondisi HHWL adalah 1,30 m pada tahun 2023 dan bertambah menjadi 1,40 m pada tahun 2050 akibat kenaikan muka air laut.

Model genangan 2023 digunakan sebagai pembanding sebaran banjir rob di lapangan dengan hasil model. Area yang diestimasi tergenang pada tahun 2023 dan 2050 pada kawasan Desa Waiheru yang ditampilkan pada Gambar 10.

Aliran pasang air laut yang masuk menggenangi pesisir Desa Waiheru berasal dari bagian sisi timur, selatan dan barat kawasan penelitian yang menghasilkan estimasi luasan area genangan sebesar seluas 0,46 ha atau 38,90% dari total luasan kawasan. Estimasi jumlah bangunan yang terdampak genangan pada tahun 2023 adalah 35 bangunan ($\pm 3305,94 \text{ m}^2$). Luasan area genangan banjir rob kemudian bertambah seluas 0,04 ha (3,10%) menjadi 0,50 ha atau 42% dari total luas kawasan penelitian pada tahun 2050 akibat kenaikan muka air laut. Estimasi jumlah bangunan pada kawasan penelitian Desa Waiheru yang terdampak banjir rob masih sama dengan kondisi pada tahun 2023 sedangkan panjang ruas jalan yang diestimasi tergenang yakni sepanjang 21 m.

Banjir rob pada kawasan ini pernah terjadi pada tanggal 8 bulan Mei tahun 2023 (14.00 – 14.30 WIT) saat kondisi tinggi pasut 0,9 m (*tides*). Area pada bagian selatan pada kondisi tersebut mengalami genangan banjir rob sesuai dengan estimasi area tergenang hasil model DTM seperti pada Gambar 11.



Gambar 10. Estimasi sebaran area banjir rob tahun 2023 (kiri) dan 2050 (kanan)



Gambar 11. Kondisi banjir rob kawasan Desa Waiheru.

KESIMPULAN

Nilai laju kenaikan muka air laut di perairan Teluk Ambon adalah 4 mm/tahun. Ketelitian peta ortofoto dan peta DEM yang dihasilkan pada ketinggian terbang UAV 100 m secara horizontal adalah 1,51 m dan vertikal adalah 0,61 m, sehingga diklasifikasikan menurut Ketelitian Peta Dasar RBI pada ketelitian horizontal kelas 2 dan ketelitian vertikal kelas 1 pada skala 1:5.000. Kontur ketinggian tanah pada kawasan penelitian berdasarkan data DTM berkisar antara 0,12 – 1,82 m. Estimasi luas genangan pada tahun 2023 adalah seluas 0,46 ha dan bertambah akibat kenaikan muka air laut menjadi 0,50 ha pada tahun 2050.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Balai Pemantapan Kawasan Hutan (BPHK) Wilayah IX Ambon yang telah bersedia menyediakan perangkat GPS Geodetik serta membantu dalam pengambilan dan pengolahan data Titik Kontrol Tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin H.Z. (2021). Review Aplikasi GNSS di Indonesia. FGD GNSS Navigasi dengan tema "Mitigasi Ionosfer Regional Pada Aplikasi GNSS di Indonesia. Pusat Riset Antariksa. LAPAN. doi: 10.13140/RG.2.2.21949.59368.
- Adebisi, N., Abdul-Lateef, B., Mahdianpari, M., & Hee Min, T. (2021). Assessing the Impacts of Rising Sea Level on Coastal Morpho-Dynamics with Automated High-Frequency Shoreline Mapping Using Multi-Sensor Optical Satellites. *Remote sensing*, 13(18), 1–22. doi: 10.3390/rs13183587
- Ahmed, S., El-Shazly, A., Abed, F., & Ahmed, W. (2022). The Influence of Flight Direction and Camera Orientation on the Quality Products of UAV-Based SfM-Photogrammetry. *Applied Science*, 12(20), 1-15. doi: 10.3390/app122010492
- Allen, M.R., Dube, O.P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K. (2018). Framing and Context in: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. pp. 49-92. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA,
- Al-Nasrawi, A.K.M., Kadhim, A.A., Shortridge, A.M., & Jones, B.G. (2021). Accounting for DEM Error in Sea Level Rise Assessment within Riverine Regions; Case Study from the Shatt Al-Arab River Region. *Environments*, 8(46), 1-14. doi: 10.3390/environments8050046
- Amrullah, C., Suwardhi, & Meilano, I. (2016). Product Accuracy Effect of Oblique and Vertical Non-Metric Digital Camera Utilization in UAV-Photogrammetry to Determine Fault Plane. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Inf. Sci*, 3(6), 41 – 48. doi: 10.5194/isprs-annals-III-6-41-2016, 2016
- Ariana, D., Kusuma, C., & Setiawan, Y. (2017). Study of Sea Level Rise Using Satellite Altimetry Data in the Sea of Dumai, Riau, Indonesia. *Journal of Geoplanning*, 4(1), 75-82. doi: 10.14710/geoplanning.4.1.75-82
- Badan Informasi Geospasial. (2014). Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. BIG.
- Badan Informasi Geospasial. (2020). Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 1 Tahun 2020 Tentang Standar Pengumpulan Data Geospasial Dasar Untuk Pembuatan Peta Dasar Skala Besar. BIG.
- Badan Informasi Geospasial. (2020). Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 Tentang Perubahan Atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. BIG.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 8202:2019 tentang Ketelitian Peta Dasar. Jakarta: BSN.
- Bäumker, M. & Heimes, F.J. (2001). New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of and Hybrid Inertial Navigation System. FH Bochum University of Applied Sciences.

- Carneiro-Barros, J.E., Plomaritis, T.A., Fazeres-Ferradosa, T., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2023). Coastal Flood Mapping with Two Approaches Based on Observations at Furadouro, Northern Portugal. *Remote Sensing*, 15(21), p.5215. doi: 10.3390/rs15215215
- Chaudhry, M.H., Ahmad, A., Gulzar, Q. (2020). Impact of UAV Surveying Parameters on Mixed Urban Landuse Surface Modelling. *ISPRS International Journal of Geo-information*, 9(11), 1-17. doi: 10.3390/ijgi9110656
- Chen, C., Bo, T., Wu, W., Duan, Y., Zhou, Y., & Zhang, C. (2023). UAV Photogrammetry in Intertidal Mudflats: Accuracy, Efficiency, and Potential for Integration with Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 15(7), 1–19. doi: 10.3390/rs15071814
- Church, J.A., & White, N.J. (2011). Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surv Geophys*, 32, 585–602. doi: 10.1007/s10712-011-9119-1
- Cirillo, D., Zappa, M., Tangari, A., Brozzetti, F., & Letto, F. (2024). Rockfall Analysis from UAV-Based Photogrammetry and 3D Models of a Cliff Area. *Drones*, 8(31), 1–32. doi: 10.3390/drones8010031
- Devoto, S., Macovaz, V., Mantovani, M., Soldati, M., & Furlani, S. (2020). Advantages of Using UAV Digital Photogrammetry in the Study of Slow-Moving Coastal Landslides. *Remote Sensing*, 12(21), 1-28. doi.org/10.3390/rs12213566
- El-fath, D. D. I., Atmodjo, W., Helmi, M., Widada, S., & Rochaddi, B. (2022). Analisis Spasial Area Genangan Banjir Rob Setelah Pembangunan Tanggul di Kabupaten Pekalongan, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(1), 96-110.
- Fandé, M.B., Lira, C.P., & Penha-Lopes, G. (2022). Using TanDEM-X Global DEM to Map Coastal Flooding Exposure under Sea-Level Rise: Application to Guinea-Bissau. *Geo-Information*, 11(4), 1-20. doi.org/10.3390/ijgi11040225
- Gâlgău, R., Naş, S. M., Radulescu, V.M., Vereş, I.S., & Bondrea, M.V. (2023). The Use of UAVs to Obtain Necessary Information for Flooding Studies: The Case Study of Somes River, Floresti, Romania. *Applied Sciences*, 13(21), p11688. doi: 10.3390/app132111688
- Ginanjar S., Putri C.K., & Nurhakim, R. (2019). Kajian Kenaikan Muka Air Laut dan Tinggi Genangan (Rock) Pada Tahun 2023, 2028 dan 2033 di Kota Saumlaki, Kabupaten Maluku Tenggara Barat. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 6(2), 39–48.
- Griggs, G., & Reguero, B.G. (2021). Coastal Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise. *Water*. 13(16), 1- 26. doi: 10.3390/w13162151
- Gularso, H., Subiyanto, S., & Sabri, L. (2013). Tinjauan Pemotretan Udara Format Kecil Menggunakan Pesawat ModelSkywalker 1680. *Geodesi Undip*, 2(2), 78 – 94. doi:10.14710/jgundip.2013.2440
- Handoko, E.Y., Yuwono., & Ariani, R. (2019). Analisis Kenaikan Muka Air Laut Indonesia Tahun 1993-2018 Menggunakan Data Altimetri. *Geoid*, 15(1), 58-64. doi: 10.12962/j24423998.v15i1.3958
- Hidayah, Z.H., Ilhami, S.A.A., As-Syakur, A., Wiyanto, D. B., & Wirayuhanto, H. (2023). Pemodelan Spasial Genangan Akibat Kenaikan Muka Air Laut di Pesisir Selatan Kabupaten Tulungagung Jawa Timur. *Jurnal Kelautan Indonesia*. 18(1), 1-12. doi: 10.15578/jkn.v18i1.10796
- Huang, H., Pan, Y., Wang, C., & Wang, X. (2023). Nonlinear Flood Responses to Tide Level and Land Cover Changes in Small Watersheds. *Land*, 12(9), 1 – 17. doi: 10.3390/land12091743
- ICSM PCTMS. (2011). Australian tides manual SP9 V4.2. Intergovernmental committee of surveying and mapping permanent committee on tides and mean sea level. Commonwealth of Australia.
- Imani, M., Kuo, C.Y., Chen, P.C., Tseng, K.H., Kao, H.C., Lee, C.M., & Lan, W.H. (2021). Risk Assessment of Coastal Flooding under Different Inundation Situations in Southwest of Taiwan (Tainan City). *Water*, 13(880), 1- 21. doi: 10.3390/w13060880
- Indonesia Climate Change Sectoral Roadmap. (2010). Scientific Basis: Analysis and Projection of Sea Level Rise and Extreme Weather Event. Jakarta: BAPPENAS-RI.
- Jia, Y., Xiao, K., Lin, M., & Zhang X. (2022). Analysis of Global Sea Level Change Based on Multi-Source Data. *Remote Sensing*, 14(4854), 1-16. doi: 10.3390/rs14194854
- Jiménez, S.I., Waldo, O.B., Mariana, J.M.P., & Juan, E. (2021). Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-information*, 10(5), 1-27. doi: 10.3390/ijgi10050285
- Kršák, B., Blišťan, P., Paulíková, A., Puškárová, P., Kovanič, L., Palková, J., & Zelízňaková, V. (2016). Use of Low-Cost UAV Photogrammetry to Analyze the Accuracy of a Digital Elevation Model in a Case Study. *Measurement*, 91, 276 – 287. doi: 10.1016/j.measurement.2016.05.028

- Liu, X., Lian, X., Yang, W., Wang, F., Han, Y., & Zhang, Y. (2022). Accuracy Assessment of a UAV Direct Georeferencing Method and Impact of the Configuration of Ground Control Points. *Drones*, 6(2), 1-15. doi: 10.3390/drones6020030
- López-Dóriga, U., & Jiménez, J.A. (2020). Impact of Relative Sea-Level Rise on Low-Lying Coastal Areas of Catalonia, NW Mediterranean, Spain. *Water*, 12(11), 1-28. doi: 10.3390/w12113252
- Lumban-Gaol, J., Tambunan, E., Osawa, T., Pasaribu, B., & I Wayan, N. (2017). Sea Level Rise Impact on Eastern Coast of North Sumatra, Indonesia. Di Dalam: Sumi A, Fukushi K, Yamamoto K, Osawa T, Swardika EK, editor. 2nd International Forum on Sustainable in Asia. 2017 Jan 16-28; Bali, Indonesia. Udayana University Press.
- Manfreda, S., Dvorak, P., Mullerova., Herban, S., Vuono, P., Justel, J.J.A., & Perks, M. (2019). Assessing the Accuracy of Digital Surface Models Derived from Optical Imagery Acquired with Unmanned Aerial Systems. *Drones*, 3(15), 1-14. doi: 10.3390/drones3010015
- Mugnai, F., & Tucci, G. (2022). A Comparative Analysis of Unmanned Aircraft Systems in Low Altitude Photogrammetric Surveys. *Remote sensing*, 14 (3), 1–19. doi: 10.3390/rs14030726
- Mutiara, I., & Muhiddin, A.H. (2016). Pengamatan Pasang Surut untuk Penentuan Datum Ketinggian di Pantai Desa Parak, Kecamatan Bonto Matene, Kabupaten Selayar, Provinsi Sulawesi Selatan. *Spermonde*, 2(2): 44 - 46.
- Nababan, B., Hadianti, S., & Natih, N.M.N. (2015). Dinamika Anomali Paras Laut Perairan Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(1), 259 - 272. doi: 10.29244/jitkt.v7i1.9943.
- Nederhoff, K., Crosby, S.C., Van Arendonk, N.R., Grossman, E.E., Tehranirad, B., Leijnse, T., Klessens, W., & Barnard, P.L. (2024). Dynamic Modeling of Coastal Compound Flooding Hazards Due to Tides, Extratropical Storms, Waves, and Sea-Level Rise: A Case Study in the Salish Sea, Washington (USA). *Water*, 16(2), 1– 23. doi: 3390/w16020346
- Nehama, F.P.J., Veriua, Z. D. H., Mauua, C., Hibbert, A., Calafat, A., & Cotton, P.D. (2022). Validating Sea-Level Altimetry Data against Tide Gauge for Coastal Risk Analysis in Mozambique. *Marine Science and Engineering*, 10(11), 1-17. doi: 10.3390/jmse10111597
- Nerem, R.S., Chambers, D.P., Choe, C., & Mitchum, G.T. (2010). Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions. *Marine Geodesy*, 33(sup1), 435-466. doi: 10.1080/01490419.2010.49103
- Nirwansyah, A.W., & Braun, B. (2019). Mapping Impact of Tidal Flooding on Solar Salt Farming in Northern Java using a Hydrodynamic Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(10), 1 - 22. doi: 10.3390/ijgi810045
- Notti, D., Giordan, D., Caló, F., Pepe, A., Zucca, F., & Galve, J. P. (2018). Potential and Limitations of Open Satellite Data for Flood Mapping. *Remote Sensing*, 10(11), 1-30. doi:10.3390/rs10111673
- Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J. R., van de Wal, Magnan, A. K., Abd-Elgawad., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., De Conto, R. M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B., & Sebesvari, Z. (2019). Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 321–445.
- Pessacg, F., Gómez-Fernández, F., Nitsche, M., Chamo, N., Torrella, S., Ginzburg, R., & De Cristóforis P. (2022). Simplifying UAV-Based Photogrammetry in Forestry: How to Generate Accurate Digital Terrain Model and Assess Flight Mission Settings. *Forests*, 13(2), 1–27. doi:10.3390/f13020173
- Popescu, D., Ichim, L., & Stoican, F. (2017). Unmanned Aerial Vehicle Systems for Remote Estimation of Flooded Areas Based on Complex Image Processing. *Sensors*, 17(3), p446. doi: 10.3390/s17030446
- Rahman, R.M., Tubalawony, S., Noya, & Y.A. (2019). Distribusi Spasial Genangan Akibat Kenaikan Muka Air Laut di Wilayah Teluk Ambon, Maluku. Prosiding Pertemuan Ilmiah Nasional Tahunan XVI ISOI: pp 267-281.
- Santana, L.S., Araujo E Silva Ferraz, G., Marin, D.B., Barbosa B.D.S., Dos Santos, L.M., Ferraz, P.F.P., Conti, L., Camiciottolib, S., & Rossi, G. (2021). Influence of Flight Altitude and Control Points in the Georeferencing of Images Obtained by Unmanned Aerial zvehicle. *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), 59–71. doi : 10.1080/22797254.2020.1845104
- Seifert, E., Seifert, S., Vogt, H., Drew, D., van Aardt., Kunneke, A., & Seifert, T. (2019). influence of Drone Altitude, Image Overlap, and Optical Sensor Resolution on Multi-View Reconstruction of Forest Images. *Remote sensing*, 11(10), 1 - 21. doi : 10.3390/rs11101252

- Shen, Y., Tahvildari, N., Morsy, M. M., Huxley, C., Chen, T. D., & Goodall, J.L. (2022) Dynamic Modeling of Inland Flooding and Storm Surge on Coastal Cities under Climate Change Scenarios: Transportation Infrastructure Impacts in Norfolk, Virginia USA as a Case Study. *Geosciences*, 12(6), 1-24. doi : 10.3390/geosciences12060224
- Sun, H., Zhang, X., Ruan, X., Jiang, H., & Shou, W. (2024). Mapping Compound Flooding Risks for Urban Resilience in Coastal Zones: A Comprehensive Methodological Review. *Remote Sensing*, 16(2), 1 – 33. doi : 10.3390/rs16020350
- Suyudi, B., & Subroto, T. (Eds.). (2014). *Fotogrametri dan Penginderaan Jauh*. Sekolah Tinggi Pertanahan Nasional. Yogyakarta.
- Sze, L.T., Cheaw, W.G., Ahmad, Z.A., Ling, C.A., Chet, K.V., Lateh, H., & Bayuaji, L. (2015). High resolution DEM generation using small drone for interferometry SAR. *International Conference on Space Science and Communication*. Langkawi, Malaysia, 2015, pp. 366-369, doi: 10.1109/IconSpace.2015.7283801
- Tegos, A., Ziogas, A., & Bellos, V. (2023). Modern Developments in Flood Modelling. *Hydrology*, 10(5), 1- 5. doi : 10.3390/hydrology10050112
- Udin, W. S., Hassan, A.F., Ahmad, A., & Tahar, K.N. (2012). Digital Terrain Model Extraction Using Digital Aerial Imagery of Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA)*, p.272 - 275. doi: 10.1109/CSPA.2012.6194732
- Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 73, 539-543. doi: 10.1016/j.measurement.2015.06.010
- Wolf, P.R. (1983), *Elements of Photogrammetry*, 2nd edition. McGraw-Hill Book Company. USA. (online book).
- Wuriatmo, H., Koesuma, S., & Yuniato, M. (2012). Analisa Sea Level Rise dari Data Satelit Altimetri Topex/Poseidon, Jason-1 dan Jason-2 di Perairan Laut Pulau Jawa Periode 2000-2010. *Indonesia Journal of Applied Physics*, 2(7), 65–72. doi: 10.13057/ijap.v2i02.1296
- Yunus, A.P., Avtar, R., Kraines, S., Yamamuro, M., Lindberg, F., & Grimmond, C.S.B. (2016). Uncertainties in Tidally Adjusted Estimates of Sea Level Rise Flooding (Bathtub Model) for Greater London. *Remote sensing*, 8(5), 1-23. doi: 10.3390/rs8050366.