

ESTIMASI BIOMASSA POHON DI HUTAN KARST PAPUA BARAT, INDONESIA

TREE BIOMASS ESTIMATION IN KARST FOREST OF WEST PAPUA, INDONESIA

Andes Hamuraby Rozak*, Destri dan Zaenal Mutaqien

Pusat Riset Konservasi Tumbuhan dan Kebun Raya – Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Kebun Raya Cibodas, Jl. Kebun Raya Cibodas, Cipanas, Cianjur 43253 Jawa Barat

*E-mail : andes.hamuraby.rozak@lipi.go.id

Diterima: 3 Maret 2021; Direvisi: 16 Maret 2021; Disetujui: 22 Juli 2021

ABSTRAK

Indonesia diperkirakan memiliki kawasan karst seluas 14,5 juta hektar. Karakter vegetasi yang tumbuh di karst ini sangat spesifik, salah satunya karena dominasi pohon-pohon dengan diameter kecil. Dengan segala potensinya, vegetasinya memiliki peran yang signifikan sebagai pengekstraksi karbon yang kemudian disimpan dalam bentuk biomassa. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi dan mendiskusikan metode perkiraan biomassa yang ada di hutan karst yang berlokasi di Taman Wisata Alam Beriat, Sorong Selatan, Papua Barat. Sejumlah 28 plot pengamatan dibuat di kawasan hutan tersebut dengan menggunakan metode *purposive random sampling*. Biomassa pohon hutan ($DBH \geq 10$ cm) diestimasi dengan menggunakan lima persamaan yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa potensi biomassa pada lokasi penelitian sebesar 264 Mg ha^{-1} (CI 95 %: $135 - 454 \text{ Mg ha}^{-1}$). Sejumlah 38 % dari biomasnya tersebut merupakan kontribusi dari biomassa pohon besar ($DBH > 50$ cm) dimana jenis *Pometia pinnata* berkontribusi sebesar 39 % dari biomasnya. Sementara pohon kecil ($DBH 10-30$ cm) hanya berkontribusi sebesar 30 % dari total biomasnya. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan berbagai persamaan alometrik menghasilkan estimasi dan bias biomassa yang berbeda dengan perbedaan berkisar antara -14,78 % sampai dengan +17,02 % dibandingkan persamaan referensi yang digunakan. Oleh karena itu, pemilihan persamaan alometrik yang digunakan harus dipertimbangkan dengan baik sehingga ketidakpastian dalam estimasi biomassa dapat dikurangi.

Kata kunci: berat jenis kayu, karbon, persamaan alometrik, perubahan iklim, REDD+

ABSTRACT

Indonesia is estimated to have 14,5 million hectares of karst areas. The characteristic of karst vegetation is specific, one of which is the dominance of small trees. With all of the potency, their vegetation acts as a significant carbon sequester and store it in biomass. This study aims to estimate and discuss biomass estimation in the karst forest within the Nature Recreational Park of Beriat, a protected area in South Sorong, West Papua. A total of 28 plots were made in the forest using the *purposive random sampling* method. Tree biomass ($DBH \geq 10$ cm) was estimated using five different allometric equations. The results showed that the biomass was estimated at ca. 264 Mg ha^{-1} (95 % CI: $135-454 \text{ Mg ha}^{-1}$). While small trees ($DBH 10 - 30$ cm) only contribute 30 % of the total biomass, about 38 % of the biomass is the contribution of large trees ($DBH > 50$ cm), where *Pometia pinnata* contributes ca. 39 % of the biomass at plot-level. The use of various allometric equations results in different biomass estimates and biases with deviations ranged from -14.78 % to +17.02 % compared to the reference equation. Therefore, the selection of allometric equations used must be considered carefully to reduce uncertainties in biomass estimation.

Keywords: allometric model, carbon, climate change, REDD+, specific wood density

Editor: Ady Suryawan, S.Hut., M.I.L.

Korespondensi penulis: Andes Hamuraby Rozak * (andes.hamuraby.rozak@lipi.go.id)

Kontribusi penulis: **AHR**: kontributor utama berkontribusi dalam desain penelitian, penelitian lapangan, analisis data, interpretasi hasil analisis data, menulis draft pertama manuskrip; **DD**: kontributor anggota berkontribusi dalam desain penelitian dan merevisi draft pertama manuskrip; **ZM**: kontributor anggota berkontribusi dalam desain penelitian, penelitian lapangan, dan merevisi draft pertama manuskrip. Semua penulis menyetujui versi akhir dari naskah ini.

PENDAHULUAN

Salah satu bentang alam yang terdapat di Indonesia yaitu karst dengan luasan diperkirakan mencapai 14,5 juta ha (Clements *et al.*, 2006; Uhlig, 1980). Bentang alam karst merupakan formasi geologis dan terbentuk sebagai akibat proses pelarutan alami yang terus terjadi oleh air hujan dan/atau air tanah yang terjadi pada batuan dasar kalsium karbonat seperti batu kapur dan dolomit karst (Veress, 2020). Karena kekhasan dalam formasi pembentukannya, vegetasi atau hutan yang tumbuh di atas bentang alam tersebut pun menjadi spesifik dan umumnya menjadi habitat bagi sejumlah jenis unik dan endemik (Clements *et al.*, 2006). Salah satu yang menjadi ciri vegetasi karst adalah dominasi pohon berdiameter kecil dan sedikitnya pohon berukuran besar sebagai respon dari kurangnya ketersediaan hara tanah untuk pertumbuhan pohonnya (Marwiyati, 2012; Ranlund, 2011). Selain karena hal tersebut, vegetasi atau pohon yang khas merupakan akibat dari interaksi antara kompleksitas topografi dan kondisi iklim pada ekosistem karst (Clements *et al.*, 2006).

Pohon merupakan komponen utama dan penting dalam sebuah ekosistem hutan yang memiliki peranan dalam menciptakan iklim mikro (Gaudio *et al.*, 2017), siklus nutrisi tanah (Aponte *et al.*, 2013), atau sumber makanan bagi makhluk hidup lainnya (Jamnadass *et al.*, 2015). Selain beberapa peranan tersebut, pohon juga berperan sebagai penyimpan cadangan karbon dalam jumlah yang signifikan (Bastin *et al.*, 2015; Rozak *et al.*, 2017; Slik *et al.*, 2013). Melalui proses fotosintesis, pohon mensekuestrasi karbon di udara dan menyimpannya di jaringan-jaringannya seperti batang, cabang, dan daun dalam bentuk biomassa. Sehubungan dengan perannya dalam sekuestrasi karbon tersebut, hutan menyimpan cadangan karbon yang sangat besar dan memainkan peranan yang penting dalam siklus karbon global (Le Quéré *et al.*, 2018; Pan *et al.*, 2011). Penelitian di kawasan karst Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung (Sulawesi Selatan) menunjukkan bahwa potensi penyimpanan karbon pohon berkisar antara 11,35 – 56,26 Mg C ha⁻¹ (Syachrir *et al.*, 2018). Hal ini menunjukkan bahwa kawasan hutan karst berpotensi sebagai penskuestrasi dan penyimpan karbon yang cukup signifikan.

Pendugaan potensi cadangan karbon dilakukan dengan pendugaan biomassa vegetasi. Pada ekosistem hutan, biomassa umumnya difokuskan perhitungannya pada kelas pohon (yaitu tumbuhan berkayu dengan DBH \geq 10 cm) karena kontribusinya yang sangat signifikan (>80 %) terhadap keseluruhan cadangan karbon. Biomassa pohon, yang secara

sederhana didefinisikan sebagai jumlah total bahan organik pohon di atas permukaan tanah yang dinyatakan dalam ton kering (Mg), umumnya dihitung menggunakan model alometrik berbasis diameter setinggi dada (DBH) (Brown, 1997). Peningkatan ketelitian estimasi biomassa kemudian dilakukan dengan menambahkan variabel berat jenis kayu, tinggi pohon, dan koefisien iklim (Chave *et al.*, 2014; Feldpausch *et al.*, 2012). Perhitungan dengan persamaan alometrik tersebut pada umumnya berbasis persamaan alometrik yang dikembangkan untuk skala lokal atau untuk tipe hutan tertentu (Basuki *et al.*, 2009; Zaenal *et al.*, 2020) ataupun untuk skala global (Brown, 1997; Chave *et al.*, 2014; Pearson *et al.*, 2005). Bias atau ketelitian penggunaan persamaan alometrik tersebut beberapa telah didiskusikan pada tipe hutan yang berbeda (Rutishauser *et al.*, 2013; Stas *et al.*, 2017). Secara umum, persamaan generik dengan variabel berat jenis kayu dan tinggi pohon untuk skala global menghasilkan estimasi biomassa dengan bias yang kecil dibandingkan dengan persamaan lainnya.

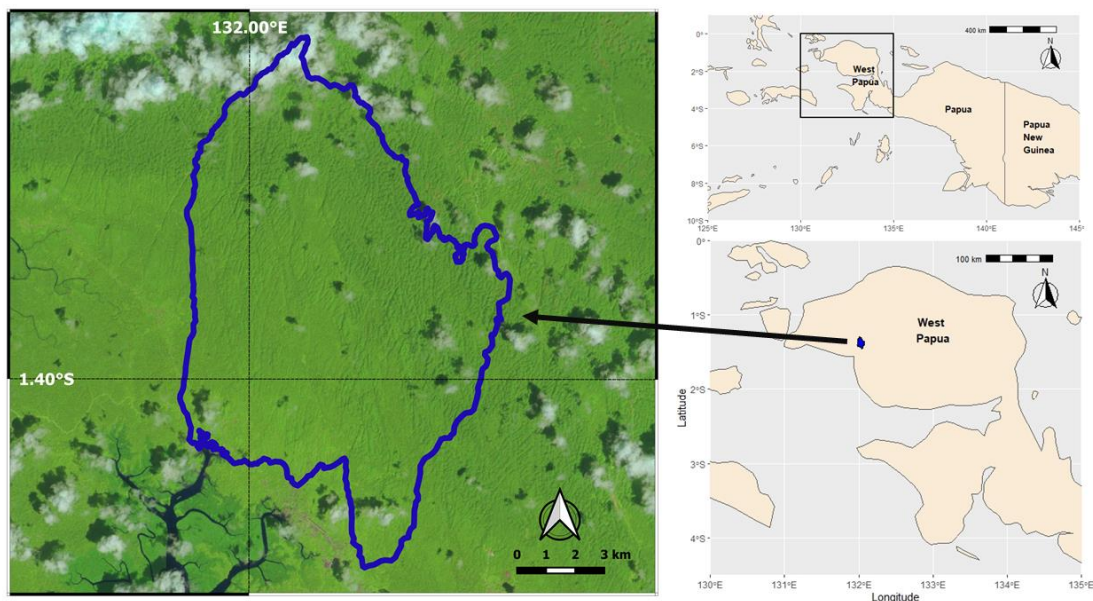
Kekhasan pohon di kawasan karst menjadikan penelitian tentang biomassa menjadi menarik. Namun demikian, penelitian dan pendugaan potensi cadangan biomassa pohon di kawasan karst masih belum banyak diungkap. Sebagian besar penelitian di kawasan karst terfokus pada kekayaan keanekaragaman hayati, baik itu untuk flora (Marwiyati, 2012; Suhendar *et al.*, 2018; Widiyanti *et al.*, 2014) maupun fauna (Pertiwi *et al.*, 2020; Setiawan *et al.*, 2018; Tamasuki *et al.*, 2016). Oleh karena itu, pertanyaan utama yaitu berapa besar cadangan biomassa atau karbon yang ada di kawasan hutan karst dan bagaimana pengaruh pemilihan persamaan alometrik dalam perhitungan biomassanya perlu untuk dijawab. Oleh karena itu, tujuan dari tulisan ini adalah untuk memperkirakan dan mendiskusikan potensi biomassa yang ada di kawasan karst disamping juga untuk menganalisis bagaimana perbedaan hasil dari penggunaan berbagai persamaan alometrik dalam perhitungan biomassa pohon yang tumbuh di hutan karst. Dengan demikian, tulisan ini akan berkontribusi dalam mengestimasi cadangan biomassa untuk hutan karst dan diharapkan dapat menjadi acuan bagaimana konsekuensi penggunaan persamaan alometrik yang berbeda dalam pengestimasian biomassa hutan.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Taman Wisata Alam (TWA) Beriat, Kabupaten Sorong Selatan, Papua Barat (Gambar 1). TWA dengan luas 9.194 ha ini dikelola oleh Balai Besar Konservasi Sumber Daya Alam Papua Barat – Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (BBKSDA Papua Barat, 2016). Secara umum, curah hujan rata-rata per tahun mencapai 5.668 mm dengan rata-rata hari hujan per tahun mencapai 259,1 hari di TWA ini. Jenis batuan yang mendominasi kawasan ini yaitu jenis batuan karst dan sedimen alluvium. Pada penelitian ini, lokasi yang

dipilih yaitu pada kawasan dengan jenis batuan karst. Topografi di TWA ini bergelombang dengan puncak tertinggi terdapat di Bolmanit yaitu mencapai 350 m dpl. Beberapa jenis tumbuhan seperti dari marga *Pometia*, *Sterculia*, dan *Endospermum* diketahui mendominasi kawasan ini (Destri *et al.*, 2020). Kawasan ini juga diketahui sebagai habitat yang baik bagi tumbuhan penghasil gaharu yaitu *Aquilaria fillaria* (Destri *et al.*, 2020; Rozak *et al.*, 2021). Selain tumbuhan, beberapa jenis hewan yang dilindungi bisa ditemui di kawasan ini seperti nuri merah kepala hitam (*Lorius lory*), kakatua putih jambul (*Cacatua galeria triton*), dan maleo (*Macrocephalon maleo*).



Gambar 1. Lokasi penelitian di Taman Wisata Alam (TWA) Beriat, Kabupaten Sorong Selatan, Provinsi Papua Barat. Garis berwarna biru menunjukkan batas wilayah TWA Beriat. Sumber peta: GloVis Sentinel-2 dan 'rnaturalearth' package

Pembuatan Plot Pengamatan dan Standardisasi Data Pohon

Dua puluh delapan plot pengamatan berukuran 10 x 10 m² dibuat secara *purposive random sampling* di TWA Beriat. Prosedur pembuatan plot pengamatan mengikuti prosedur yang dilakukan oleh Destri *et al.*, (2020). Pada masing-masing plot, data pohon (yaitu tumbuhan berkayu) yang meliputi nama jenis dan diameter setinggi dada ($DBH \geq 10$ cm) dicatat. Jika pohon yang diukur memiliki banir, maka DBH didapatkan dari nilai diameter pohon pada posisi 30 cm di atas banir. Nilai DBH tiap pohon kemudian dikelompokkan menjadi 3 kelas pohon, yaitu pohon kecil (DBH 10 – 30 cm), pohon sedang (DBH 30 – 50 cm), dan pohon besar ($DBH > 50$ cm). Nama jenis merupakan hasil identifikasi langsung oleh *parabotanis* di lapangan. Beberapa pohon yang tidak

teridentifikasi sampai tingkat jenis dibuat spesimen herbariumnya kemudian diidentifikasi di Herbarium Kebun Raya Cibodas. Nama ilmiah jenis yang telah teridentifikasi kemudian distandardisasi melalui *the Taxonomic Name Resolution Service* melalui antarmuka *Taxosaurus* (Boyle *et al.*, 2013).

Perhitungan dan Analisis Data

Perhitungan estimasi biomassa masing-masing pohon (kg) dilakukan dengan menggunakan lima persamaan alometrik yang berbeda yang umum digunakan dalam perhitungan biomassa (Tabel 1). Persamaan generik E1 dari Chave *et al.*, (2014) dijadikan sebagai persamaan referensi karena menggunakan sampel yang banyak dari hutan tropis dan terbukti memiliki bias yang kecil dibandingkan dengan persamaan yang lain (Rutishauser *et al.*, 2013;

Stas *et al.*, 2017; Zaenal *et al.*, 2020). Tiga persamaan alometrik yaitu E1, E4, dan E5 menggunakan variabel berat jenis kayu (ρ) yang didapat dari *database* global (Chave *et al.*, 2009; Zanne *et al.*, 2009). Nilai berat jenis kayu yang jenis pohonnya tidak diketahui didapat dari nilai rata-rata berat jenis pada genus pohon tersebut (Slik, 2006). Dua persamaan alometrik yaitu E1 dan E5 menggunakan data tinggi pohon (H)

dalam memprediksi biomassa pohonnya. Pendugaan data H dilakukan dengan menggunakan persamaan alometrik dari nilai DBH -nya (Feldpausch *et al.*, 2012). Persamaan alometrik yang digunakan untuk memprediksi tinggi pohon tersebut adalah:

$$H = 57.122 * (1 - \exp(-0.0332 * DBH^{0.8468}))$$

Tabel 1. Persamaan alometrik yang digunakan dalam perhitungan estimasi biomassa (AGB_{est}). DBH adalah nilai diameter setinggi dada pohon (cm), ρ adalah nilai berat jenis kayu ($g\ cm^{-3}$), dan H adalah nilai tinggi pohon (m)

Kode	Referensi	Region	Persamaan	DBH (cm)	Ukuran sampel
E1	Chave <i>et al.</i> (2014)	Pantropis	$AGB_{est} = \exp\{0,0673 * (\rho * DBH * H)^{0,976}\}$	5-212	4004
E2	Brown (1997)	Pantropis	$AGB_{est} = \exp\{-2,134 + 2,530 * \ln(DBH)\}$	5-148	170
E3	Pearson <i>et al.</i> (2005)	Pantropis	$AGB_{est} = \exp\{-2,289 + 2,649 * \ln(DBH) - 0,021 * \ln(DBH)^2\}$	5-156	226
E4	Basuki <i>et al.</i> (2009)	Kalimantan Timur	$AGB_{est} = \exp\{-0,744 + 2,188 * \ln(DBH) + 0,832 * \ln(\rho)\}$	6,5-200	122
E5	Zaenal <i>et al.</i> (2020)	Maluku	$AGB_{est} = 0,076 * (\rho * DBH^2 * H)^{0,963}$	5,4-36.9	18

Perhitungan bias biomassa (%) pada masing-masing plot dilakukan dengan membandingkan persamaan lain terhadap persamaan E1. Persamaan yang digunakan adalah:

$$Bias = \frac{AGB_{Chave} - AGB_i}{AGB_{Chave}} * 100\%$$

dimana AGB_{Chave} adalah estimasi biomassa dari persamaan E1 dan AGB_i adalah estimasi biomassa dari persamaan lain. *Root Mean Squared Error* (RMSE, dalam $Mg\ ha^{-1}$) masing-masing persamaan terhadap E1 juga dihitung dalam analisis biomassa ini. Persamaannya yaitu:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\widehat{AGB}_i - AGB_{Chave})^2}{n}}$$

dimana \widehat{AGB}_i adalah nilai estimasi biomassa dari plot i , AGB_{Chave} adalah nilai pendugaan biomassa dari persamaan E1 dan n adalah jumlah plot pengamatan.

Perhitungan masing-masing variabel pengamatan yang meliputi jumlah genus, jumlah jenis, jumlah individu, basal area, biomassa pohon (kg), dan rata-rata biomassa per satuan area ($Mg\ ha^{-1}$) dilakukan dengan metode *bootstrap* dengan 1000x (DiCiccio *et al.*, 1996). Metode *bootstrap* dilakukan karena jumlah sampel penelitian yang terbatas ($n = 28$ plot) dan data masing-masing variabel yang dianalisis tidak

terdistribusi secara normal. Pada variabel-variabel tersebut, dihitung juga nilai selang kepercayaan 95 % atau 95 % *confidence interval* (95 % CI). Persamaan linear sederhana dilakukan untuk menguji keterkaitan antara biomassa yang diduga dari persamaan E1 terhadap persamaan lain yang digunakan dalam penelitian ini. Semua analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak R (R Core Team, 2020) pada platform R Studio (RStudio Team, 2020) dengan memanfaatkan paket ‘boot’ untuk melakukan *bootstrap* (Canty *et al.*, 2019), ‘BIOMASS’ untuk standardisasi nama jenis, mengunduh data berat jenis kayu, dan menghitung biomassa pohon (Réjou-Méchain *et al.*, 2017), dan ‘ggplot2’ untuk visualisasi hasil penelitian (Wickham, 2009).

HASIL DAN PEMBAHASAN
Potensi Biomassa Hutan Karst

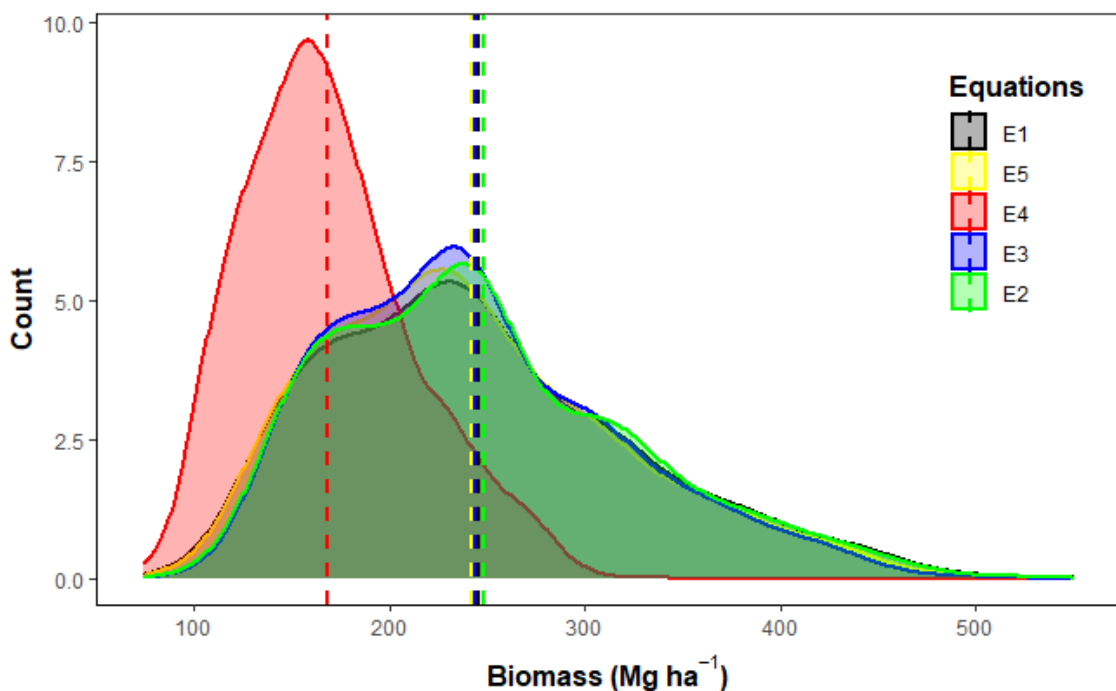
Empat persamaan yaitu persamaan E1, E2, E3, dan E5 memprediksi rata-rata biomassa pada rentang yang hampir sama yaitu pada kisaran 260 – 266 $Mg\ ha^{-1}$ (Tabel 2 dan Gambar 2). Sementara persamaan E4 memprediksi biomassa pohon berada pada nilai 181 $Mg\ ha^{-1}$. Penyebab *underestimate*-nya E4 kemungkinan disebabkan karena sampel penelitian pohon hanya berasal dari 4 genus saja yaitu *Dipterocarpus*, *Hopea*, *Palaquium*, dan *Shorea* (Basuki *et al.*, 2009) sehingga tidak bisa menjelaskan variasi biomassa jenis-jenis lainnya. Perbedaan-perbedaan terkait potensi biomassa secara umum dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Dua faktor

utama adalah (1) perbedaan metode dalam perhitungan biomassa-nya (Rutishauser *et al.*, 2013; Stas *et al.*, 2017; Zaenal *et al.*, 2020), dan (2) perbedaan dari struktur dan komposisi jenis hutan

yang kemudian berkaitan dengan nilai *DBH* dan berat jenis kayu yang digunakan pada tiap persamaan alometriknya (Chave *et al.*, 2014).

Tabel 2. Rata-rata biomassa hutan karst (Mg ha^{-1}) berdasarkan persamaan alometrik yang digunakan dan nilai 95 % CI-nya.

Kode	Persamaan acuan	Rata-rata biomassa	Batas bawah (2.5 % data)	Batas atas (97.5 % data)
E1	Chave <i>et al.</i> (2014)	264,14	135,09	453,69
E2	Brown (1997)	266,38	146,27	452,74
E3	Pearson <i>et al.</i> (2005)	261,77	147,41	436,10
E4	Basuki <i>et al.</i> (2009)	181,18	107,76	282,96
E5	Zaenal <i>et al.</i> (2020)	260,23	135,66	441,38



Gambar 2. Perbandingan estimasi biomassa dengan menggunakan lima persamaan yang berbeda untuk ekosistem hutan karst. Garis vertikal terputus menunjukkan nilai rata-rata biomassa hutan masing-masing persamaan. Kode persamaan E1 = Chave *et al.* (2014), E2 = Brown (1997), E3 = Pearson *et al.* (2005), E4 = Basuki *et al.* (2009), dan E5 = Zaenal *et al.* (2020)

Dibandingkan dengan potensi biomassa di kawasan kepala burung Papua, nilai biomassa pohon di TWA Beriat lebih rendah daripada potensi biomassa di hutan Distrik Bamusbama ($383,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) namun lebih tinggi dibandingkan hutan yang ada di Distrik Fef ($224,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Nugroho *et al.*, 2019). Namun demikian, perbedaan potensi biomassa tersebut tidak berbeda signifikan karena masih berada dalam kisaran selang kepercayaan 95 % dari penelitian ini (Tabel 2). Perbedaan signifikan diketahui jika dibandingkan dengan hutan karst di Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung (Sulawesi Selatan) yang hanya memiliki biomassa pohon antara $22,70-112,52 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Syachrir *et al.*, 2018). Selanjutnya,

pembandingan potensi biomassa dengan tipe hutan lain diketahui bahwa hutan karst TWA Beriat memiliki potensi biomassa yang secara signifikan jauh lebih rendah seperti pembandingan dengan hutan dataran rendah Dipterokarpa di Kalimantan Utara (410 Mg ha^{-1} , Rozak *et al.*, 2018) atau hutan pegunungan Taman Nasional Gunung Gede Pangrango di Jawa Barat (375 Mg ha^{-1} , Rozak *et al.*, 2017). Perbedaan potensi biomassa dengan tipe hutan lain utamanya disebabkan karena perbedaan struktur dan komposisi hutannya. Sebagai contoh, perbedaan dominasi pohon kecil dan sedikitnya jumlah pohon besar di hutan karst (Destri *et al.*, 2020) sebagai respon dari kondisi karst yang miskin nutrisi, tipisnya lapisan

permukaan tanah, dan daerahnya mengalami masa kering yang ekstrim (Vermeulen *et al.*, 1999), telah mengakibatkan secara rata-rata biomassa hutan karst relatif lebih rendah dibandingkan dengan jenis hutan lainnya (Rozak *et al.*, 2018, Rozak *et al.*, 2017).

Kontribusi Pohon Besar terhadap Biomassa Hutan Karst

Rata-rata biomassa pohon hutan karst pada tingkat plot sebesar 2.456 kg (95 % CI: 1.259 –

4.281 kg) dan didominasi oleh pohon berukuran besar (*DBH* >50 cm) yaitu mencapai 38,3 % (941 kg; 95 % CI: 0 – 2.654 kg) walaupun luas bidang dasarnya hanya mencapai 21,1 % (507 cm²; 95 % CI: 0 – 1.414 cm²) dari total luas bidang dasarnya (Tabel 3). Biomassa pohon sedang (*DBH* 30 – 50 cm) dan kecil (10 – 30 cm) masing-masing hanya berkontribusi 31,6 % dan 30 % dari total biomasannya dengan luas bidang dasar mencapai masing-masing 29,5 % dan 49,4 %.

Tabel 3. Variasi jumlah genus (rata-rata genus per plot), jenis (rata-rata jenis per plot), individu (rata-rata individu per plot), luas bidang dasar (m²), dan biomassa pohon (kg) beserta nilai 95 % CI-nya pada tingkat plot (10 x 10 m²) di hutan karst TWA Beriat Papua Barat berdasarkan kelas pohon

Kelas pohon	Genus (per plot)	Jenis (per plot)	Individu (per plot)	Basal area (m ²)	Biomassa (kg)
<i>DBH</i> 10 – 30 cm	4,67 (3,86-5,50)	4,78 (3,93-5,64)	5,59 (4,53-6,75)	0,12 (0,09-0,15)	737,38 (569,19-932,02)
<i>DBH</i> >30 – 50 cm	0,61 (0,39-0,89)	0,61 (0,39-0,89)	0,65 (0,39-0,96)	0,07 (0,04-0,11)	777,22 (430,95-1.246,48)
<i>DBH</i> >50 cm	0,07 (0,00-0,18)	0,07 (0,00-0,18)	0,07 (0,00-0,18)	0,05 (0,00-0,14)	941,20 (0,00-2.654,46)
Total	5,13 (4,21-6,07)	5,28 (4,32-6,25)	6,31 (5,11-7,57)	0,24 (0,16-0,34)	2.455,80 (1.258,58-4.280,80)

Kontribusi pohon berukuran besar terhadap biomassa di TWA Beriat sejalan dengan penelitian lain namun dengan proporsi yang berbeda-beda (Fauset *et al.*, 2015; Rozak *et al.*, 2017; Slik *et al.*, 2013). Pada hutan dataran rendah tropis Asia, pohon berukuran besar (*DBH* ≥70 cm) merepresentasikan 39 % dari total biomasannya, sementara proporsi yang lebih kecil (25 %) ditemukan di hutan tropis Afrika (Slik *et al.*, 2013). Kontribusi pohon besar yang cukup signifikan juga ditemukan di hutan pegunungan. Sebagai contoh, pohon besar (*DBH* >50 cm) berkontribusi sebesar 39 % terhadap biomassa pohon di hutan Taman Nasional Gunung Gede Pangrango (Rozak *et al.*, 2017). Konsep signifikansi proporsi biomassa pohon berukuran besar terhadap total biomassa ini secara umum dikenal dengan istilah hiperdominansi biomassa (Fauset *et al.*, 2015) dan beberapa penelitian telah menjadikan pohon besar sebagai *proxy* dalam memprediksi potensi biomassa total hutannya (Bastin *et al.*, 2015, 2018).

Tingginya kontribusi pohon berukuran besar terhadap biomassa, meskipun luas bidang dasarnya atau jumlah individu per satuan luasnya rendah (Tabel 3), menunjukkan pentingnya konservasi terhadap pohon berukuran besar (Lutz *et al.*, 2018). Selain sebagai penskuestrasi karbon di udara dan penyimpan cadangan karbon yang sangat signifikan, pohon besar memainkan peranan yang penting dalam

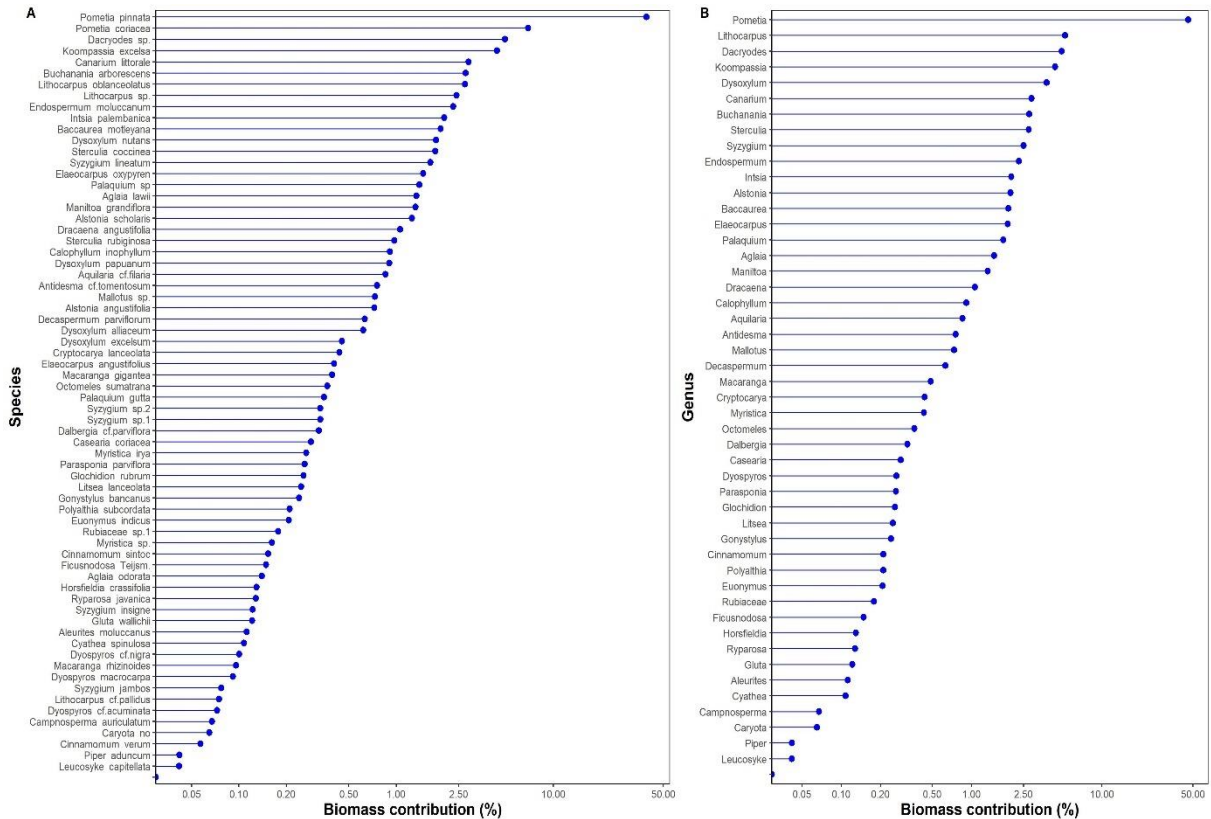
pembentukan struktur suatu hutan sehingga integritas hutannya tetap terjaga (Lindenmayer *et al.*, 2012, 2014). Namun sayangnya, secara global jumlah pohon besar ini semakin menurun sehingga mengancam integritas suatu ekosistem hutan (Lindenmayer *et al.*, 2012). Oleh karena itu, menjaga kelestarian pohon besar perlu untuk dilakukan sehingga peranannya sebagai penyimpan cadangan karbon dan penjaga integritas ekosistem dapat terus berlanjut.

Kontribusi Jenis terhadap Biomassa Hutan Karst

Kontribusi biomassa jenis tertinggi didapat oleh jenis *Pometia pinnata* (39 % dari total biomassa) kemudian disusul oleh jenis *Pometia coriacea* (7 %) dan *Dacryodes* sp. (5 %) (Gambar 3A). Kontribusi biomassa tertinggi pada tingkat genus adalah *Pometia* (46% dari total biomassa), kemudian *Lithocarpus* (5 %) dan *Dacryodes* (5 %) (Gambar 3B). Kontribusi *Pometia pinnata* tersebut tidak mengherankan karena jenis tersebut diketahui memiliki relatif basal area yang tinggi yaitu mencapai 22 % dari total basal area di hutan karst (Destri *et al.*, 2020). *Pometia pinnata* atau lebih dikenal dengan nama lokal mataoa merupakan pohon tropis yang dapat mencapai *DBH* 140 cm dan tinggi mencapai 50 m (Jacobs, 1962). Pohon jenis tersebut secara umum terdistribusi di kawasan Malesia dan umum ditemukan di hutan dataran rendah Papua (Adema *et al.*, 1994). Dengan ukuran *DBH* dan tinggi pohon tersebut, tidak

mengerahkan jika jenis tersebut memiliki biomassa yang tinggi. Selain *Pometia pinnata*, jenis *Pometia* lainnya yaitu *P. coriacea* berkontribusi sebesar 7 % dari total biomasannya (Gambar 3) sehingga secara

total kontribusi genus *Pometia* terhadap total biomassa mencapai 46 %. Dengan demikian, genus *Pometia* ini berperan penting dalam konservasi biomassa di hutan karst Papua Barat.

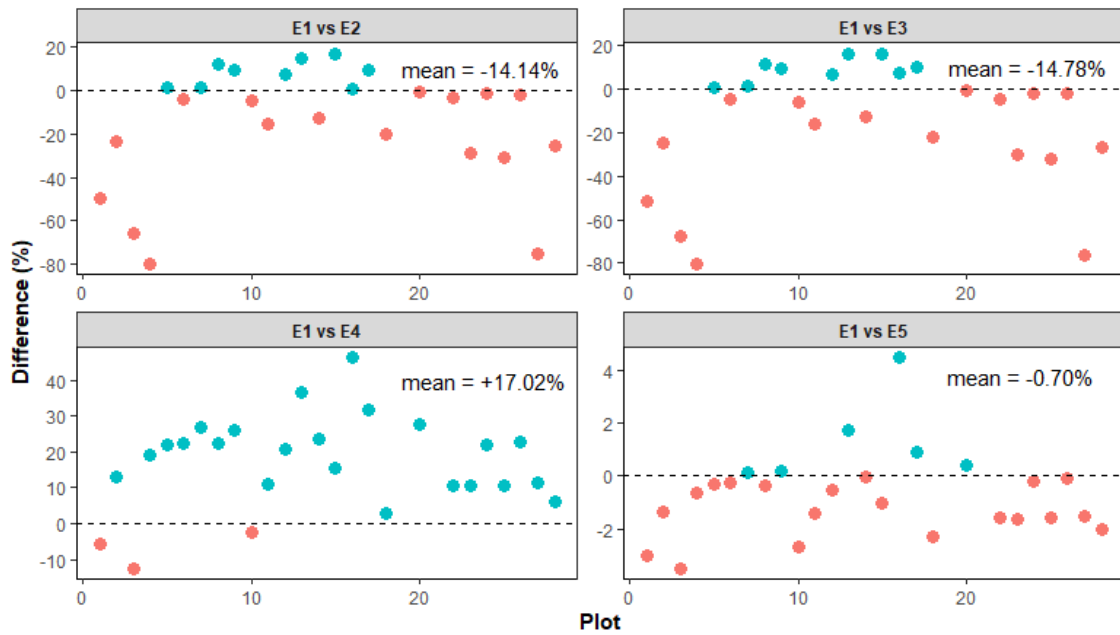


Gambar 3. Kontribusi biomassa masing-masing jenis (panel A) dan genus (panel B) terhadap biomassa total di hutan Karst Papua Barat

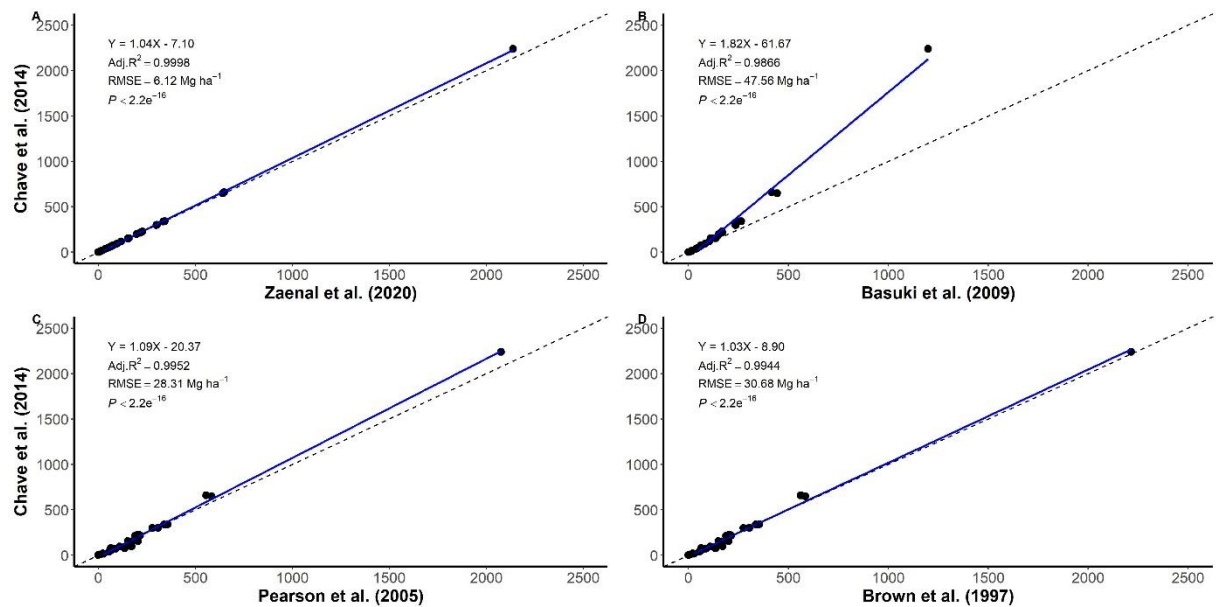
Pemilihan dan Penggunaan Persamaan Alometrik

Rata-rata perbedaan perkiraan biomassa antara persamaan E1 dengan empat persamaan lainnya pada level plot pengamatan berkisar antara -14,78 % sampai dengan +17,02 % (Gambar 4). Rata-rata bias pada level plot pengamatan untuk persamaan E2, E3, E4, dan E5 masing-masing sebesar -14,14 %, -14,78 %, +17,02 %, dan -0,70 % dibandingkan dengan persamaan E1. Persamaan E5 menunjukkan bias terkecil (-3,5 % sampai dengan +4,5 %) pada level plot

pengamatan. Hal ini sejalan dengan hasil analisis persamaan linear yang menunjukkan bahwa nilai RMSE dari persamaan E5 terhadap E1 terhitung paling kecil yaitu 6,12 Mg ha⁻¹ (Gambar 5D). Bias terbesar ditunjukkan oleh penggunaan persamaan E4 yang mencapai -12,5 % sampai dengan +46,4 % (Gambar 4). Hal tersebut sejalan juga dengan paling tingginya nilai RMSE persamaan E4 dibandingkan E1 yang mencapai 47,56 Mg ha⁻¹ (Gambar 5C).



Gambar 4. Persentase perbedaan penggunaan persamaan alometrik dibandingkan dengan persamaan E1 pada masing-masing plot pengamatan. Titik berwarna merah dan biru menunjukkan masing-masing *under-* (nilai negatif) dan *over-estimate* (nilai positif) biomassa hutan. Kode persamaan E1 = Chave *et al.*, (2014), E2 = Brown (1997), E3 = Pearson *et al.*, (2005), E4 = Basuki *et al.*, (2009), dan E5 = Zaenal *et al.*, (2020)



Gambar 5. Analisis persamaan linear masing-masing persamaan alometrik terhadap persamaan Chave *et al.* (2014). Garis solid warna biru menunjukkan garis persamaan linear dan garis terputus warna hitam menunjukkan garis referensi 1:1. Kode persamaan E1 = Chave *et al.*, (2014), E2 = Brown (1997), E3 = Pearson *et al.*, (2005), E4 = Basuki *et al.*, (2009), dan E5 = Zaenal *et al.*, (2020)

Bias rata-rata terkecil relatif terhadap persamaan E1 adalah perhitungan yang dilakukan dengan persamaan E5 (Gambar 4). Hal ini kemungkinan disebabkan karena miripnya asal sampel penelitian yaitu hutan dataran rendah di kawasan Indonesia Timur, dalam hal ini Halmahera (Maluku Utara).

Meskipun jumlah sampel penelitian persamaan E5 relatif kecil ($n = 18$ pohon, $DBH = 5,4 - 36,9$ cm) namun datanya kemungkinan mampu merepresentasikan komunitas hutan karst yang didominasi oleh pohon berdiameter kecil (Marwiyati, 2012; Ramlund, 2011). Selain itu, kecilnya bias E5

terhadap E1 dibandingkan dengan persamaan lainnya, kemungkinan disebabkan karena nilai rata-rata berat jenis kayunya yang relatif sama yaitu $0,48 \text{ g cm}^{-3}$ (penelitian ini) vs $0,46 \text{ g cm}^{-3}$ (persamaan E5). Secara umum, dua persamaan lainnya yaitu E2 dan E3 memiliki perbedaan yang tidak signifikan dibandingkan E1 (Gambar 4), namun tampak berbeda dibandingkan dengan persamaan E4 meskipun tidak signifikan berdasarkan nilai 95 % CI-nya (Gambar 2).

Kecilnya bias dari tiga persamaan (E2, E3, dan E5) dibandingkan dengan persamaan E4 terhadap E1 terlihat dari kecilnya nilai RMSE dari persamaan linearnya (Gambar 5). Persamaan E4 memiliki bias rata-rata terbesar (+17,02 %) dan juga RMSE tertinggi ($47,56 \text{ Mg ha}^{-1}$) dibandingkan tiga persamaan lainnya terhadap persamaan E1. Besarnya bias persamaan E4 relatif terhadap E1 kemungkinan disebabkan karena sampel jenis pohon yang digunakan oleh E4 tidak mampu merepresentasikan variasi jenis pada hutan karst. Diketahui bahwa persamaan E4 hanya berasal dari 4 genus yang tumbuh di Hutan Dipterokarpa Kalimantan sehingga tidak sensitif terhadap jenis lainnya (Basuki *et al.*, 2009). Perbedaan dari nilai-nilai uji statistik persamaan-persamaan yang diuji menunjukkan bahwa pemilihan model persamaan akan berdampak pada estimasi biomasanya (Rutishauser *et al.*, 2013; Stas *et al.*, 2017). Namun demikian, persamaan alometrik mana yang memberikan estimasi yang akurat masih menjadi pertanyaan yang tidak bisa terjawab dalam penelitian ini karena nilai sebenarnya tidak pernah diteliti. Penelitian lanjutan untuk memvalidasi dan mengembangkan persamaan alometrik berdasarkan metode destruktif perlu untuk dilakukan sehingga nilai presisi estimasi biomassa pada hutan karst dan ketidakpastian masing-masing persamaan dapat diketahui.

KESIMPULAN

Biomassa hutan karst TWA Beriat Papua Barat diestimasi sebesar 264 Mg ha^{-1} (CI 95 %: $135 - 454 \text{ Mg ha}^{-1}$). Pengestimasi biomassa dengan berbagai persamaan alometrik menghasilkan batas bawah sebesar 108 Mg ha^{-1} (dengan persamaan E4) dan batas atas 454 Mg ha^{-1} (dengan persamaan E1). Sejumlah 38 % dari biomasanya tersebut merupakan kontribusi dari biomassa pohon besar ($DBH > 50 \text{ cm}$) dimana jenis *Pometia pinnata* berkontribusi sebesar 39 % dari biomasanya. Sementara pohon kecil ($DBH 10-30 \text{ cm}$) hanya berkontribusi sebesar 30 % dari total biomasanya. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan berbagai persamaan alometrik

menghasilkan estimasi dan bias biomassa yang berbeda dengan perbedaan berkisar antara -14,78 % sampai dengan +17,02 % dibandingkan persamaan referensi yang digunakan.

SARAN

Perbedaan hasil estimasi biomassa masing-masing persamaan alometrik mengindikasikan pentingnya dilakukan pertimbangan ketika akan digunakannya suatu persamaan karena terkait dengan presisi dan ketidakpastian atas hasil perhitungannya. Penggunaan persamaan alometrik yang mengintegrasikan variabel *DBH*, berat jenis kayu, dan tinggi pohon direkomendasikan untuk digunakan di hutan karst. Selain itu, untuk mendapatkan nilai estimasi biomassa di hutan karst secara lebih akurat, penelitian lanjutan perlu dilakukan yaitu dengan menambah sampel plot penelitian yang tersebar secara merata sehingga dapat mewakili ekosistem hutan karst.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Balai Besar Konservasi Sumber Daya Alam Papua Barat dan staf atas bantuannya dalam perizinan melakukan penelitian di TWA Beriat. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Rustandi B, Daseng Ahmad Samsudin, Eko Susanto, Mohamad Rizki Riadhi, Abdul Rahman Wahid, dan Keluarga Besar Karsaw atas bantuannya dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adema, F., Leenhouts, P. W., & van Welzen, P. C. (1994). *Flora Malesiana: Sapindaceae* (Vol. 11, part 3). Leiden: Rijksherbarium/Hortus Botanicus.
- Aponte, C., García, L. V., & Marañón, T. (2013). Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence. *Forest Ecology and Management*, 309, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.035>
- Bastin, J. -F., Barbier, N., Réjou-Méchain, M., Fayolle, A., Gourlet-Fleury, S., Maniatis, D., Haulleville, T. de, Baya, F., Beeckman, H., Beina, D., Couteron, P., Chuyong, G., Dauby, G., Doucet, J.-L., Droissart, V., Dufrene, M., Ewango, C., Gillet, J. F., Gonmadje, C. H., Hart, T., Kavali, T., Kenfack, D., Libalah, M., Malhi, Y., Makana, J. -R., Pélissier, R., Ploton, P., Serckx, A., Sonké, B., Stevart, T., Thomas, D. W., Cannière, C.D., & Bogaert, J. (2015). Seeing Central African forests through their largest trees. *Scientific Reports*, 5, srep13156. <https://doi.org/10.1038/srep13156>
- Bastin, J. -F., Rutishauser, E., Kellner, J. R., Saatchi, S., Pélissier, R., Hérault, B., Slik, J. W. F., Bogaert, J., Cannière, C. D., Marshall, A. R., Alvarez, P., Andrade, A., Angbonga, A., Araujo, A., Arroyo, L., Ayyappan, N., de Azevedo, C. P., Banki, O., Barbier, N., Barroso, J. G., Beeckman, H., Bitariho, R., Boeckx, P., Boehning, K., Brandão, H., Brearley, F. Q., Hockemba, M. B. N., Brienen, R., Camargo, J. L. C., Campos-Arceiz, A., Cassart, B., Chave, J.,

- Chazdon, R., Chuyong, G., Clark, D. B., Clark, C. J., Condit, R., Coronado, E. N. H., Davidar, P., de Haulleville, T., Descroix, L., Doucet, L., Dourdain, A., Droissart, V., Duncan, T., Espejo, J. S., Espinosa, S., Farwig, N., Fayolle, A., Feldpausch, T. R., Ferraz, A., Fletcher, C., Gajapersad, K., Gillet, F., Gonmadje, C., Grogan, J., Harris, D., Herzog, S. K., Homeier, J., Hubau, W., Hubbell, S. P., Hufkens, K., Hurtado, J., Kamdem, N. G., Kearsley, E., Kenfack, D., Kessler, M., Labrière, N., Laumonier, Y., Laurance, S., Laurance, W. F., Lewis, S. L., Libalah, M. B., Ligo, G., Lloyd, J., Lovejoy, T. E., Malhi, Y., Marimon, B. S., Junior, B. H. M., Martin, E. H., Matus, P., Meyer, V., Bautista, C. M., Monteagudo, A., Mtui, A., Neill, D., Gutierrez, G. A. P., Pardo, G., Parren, M., Parthasarathy, N., Phillips, O. L., Pitman, N. C. A., Ploton, P., Ponette, Q., Ramesh, B. R., Razafimahaimodison, C., & Réjou, M. (2018). Pan - tropical prediction of forest structure from the largest trees. *Global Ecology and Biogeography*, 27(11), 1366–1383. <https://doi.org/10.1111/geb.12803>
- Basuki, T. M., van Laake, P. E., Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2009). Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management*, 257(8), 1684–1694. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>
- BBKSDA Papua Barat. (2016). *Buku Informasi Kawasan Konservasi Balai Besar Konservasi Sumber Daya Alam Papua Barat*. Sorong, Papua Barat: Balai Besar KSDA Papua Barat.
- Boyle, B., Hopkins, N., Lu, Z., Raygoza Garay, J. A., Mozhherin, D., Rees, T., Matasci, N., Narro, M. L., Piel, W. H., Mckay, S.J., Lowry, S., Freeland, C., Peet, R. K., & Enquist, B. J. (2013). The taxonomic name resolution service: An online tool for automated standardization of plant names. *BMC Bioinformatics*, 14, 16. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-16>
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A Primer*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Diakses dari <http://www.fao.org/docrep/W4095E/w4095e00.htm#Contents>
- Canty, A., & Ripley, B. (2019). *boot: Bootstrap R (S-Plus) function*. Diakses dari <https://cran.r-project.org/web/packages/boot/boot.pdf>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., Péllissier, R., Ploton, P., Ryan, C. M., Saldarriaga, J. G., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12(4), 351–366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- Clements, R., Sodhi, N. S., Schilthuizen, M., & Ng, P. K. L. (2006). Limestone karsts of Southeast Asia: Imperiled arks of biodiversity. *BioScience*, 56(9), 733. [https://doi.org/10.1641/00063568\(2006\)56\[733:LKOSAI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/00063568(2006)56[733:LKOSAI]2.0.CO;2)
- Destri, Mutaqien, Z., & Rozak, A. H. (2020). Posisi gaharu dalam struktur komunitas hutan dan penurunan potensinya di Papua Barat. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.18330/jwallacea.2020.vol9iss1pp1-12>
- DiCiccio, T. J., & Efron, B. (1996). Bootstrap confidence intervals. *Statistical Science*, 11(3), 189–212.
- Fauset, S., Johnson, M. O., Gloor, M., Baker, T. R., M, A. M., Brienen, R. J. W., Feldpausch, T. R., Lopez-Gonzalez, G., Malhi, Y., ter Steege, H., Pitman, N. C. A., Baraloto, C., Engel, J., Pétronelli, P., Andrade, A., Camargo, J. L. C., Laurance, S. G. W., Laurance, W. F., Chave, J., Allie, E., Vargas, P. N., Terborgh, J. W., Ruokolainen, K., Silveira, M., C, G. A. A., Arroyo, L., Bonal, D., Ramirez-Angulo, H., Araujo-Murakami, A., Neill, D., Hérault, B., Dourdain, A., Torres-Lezama, A., Marimon, B. S., Salomão, R. P., Comiskey, J. A., Réjou-Méchain, M., Toledo, M., Licona, J. C., Alarcón, A., Prieto, A., Rudas, A., van der Meer, P. J., Killeen, T. J., Marimon Junior, B. -H., Poorter, L., Boot, R. G. A., Stergios, B., Torre, E. V., Costa, F. R. C., Levis, C., Schiatti, J., Souza, P., Groot, N., Arets, E., Moscoso, V. C., Castro, W., Coronado, E. N. H., Peña-Claros, M., Stahl, C., Barroso, J., Talbot, J., Vieira, I. C. G., van der Heijden, G., Thomas, R., Vos, V. A., Almeida, E. C., Davila, E. A., Aragão, L. E. O. C., Erwin, T. L., Morandi, P. S., de Oliveira, E. A., Valadão, M. B. X., Zagt, R. J., van der Hout, P., Loayza, P. A., Pipoly, J. J., Wang, O., Alexiades, M., Cerón, C. E., Huamantupa-Chuquimaco, I., Di Fiore, A., Peacock, J., Camacho, N. C. P., Umetsu, R. K., de Camargo, P. B., Burnham, R. J., Herrera, R., Quesada, C. A., Stropp, J., Vieira, S. A., Steininger, M., Rodríguez, C. R., Restrepo, Z., Muelbert, A. E., Lewis, S. L., Pickavance, G. C., & Phillips, O. L. (2015). Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms7857>
- Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Lewis, S. L., Brienen, R. J. W., Gloor, M., Monteagudo Mendoza, A., Lopez-Gonzalez, G., Banin, L., Abu Salim, K., Affum-Baffoe, K., Alexiades, M., Almeida, S., Amaral, I., Andrade, A., Aragão, L. E. O. C., Araujo Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., Aymard C., G. A., Baker, T. R., Bánki, O. S., Berry, N. J., Cardozo, N., Chave, J., Comiskey, J. A., Alvarez, E., de Oliveira, A., Di Fiore, A., Djagbletey, G., Domingues, T. F., Erwin, T. L., Fearnside, P. M., França, M. B., Freitas, M. A., Higuchi, N., E. Honorio C., Iida, Y., Jiménez, E., Kassim, A. R., Killeen, T.J., Laurance, W. F., Lovett, J. C., Malhi, Y., Marimon, B.S., Marimon-

- Junior, B. H., Lenza, E., Marshall, A.R., Mendoza, C., Metcalfe, D. J., Mitchard, E. T. A., Neill, D.A., Nelson, B.W., Nilus, R., Nogueira, E.M., Parada, A., Peh, K.S.-H., Pena Cruz, A., Peñuela, M.C., Pitman, N.C.A., Prieto, A., Quesada, C.A., Ramírez, F., Ramírez-Angulo, H., Reitsma, J.M., Rudas, A., Saiz, G., Salomão, R.P., Schwarz, M., Silva, N., Silva-Espejo, J.E., Silveira, M., Sonké, B., Stropp, J., Taedoumg, H.E., Tan, S., ter Steege, H., Terborgh, J., Torello-Raventos, M., van der Heijden, G.M.F., Vásquez, R., Vilanova, E., Vos, V.A., White, L., Willcock, S., Woell, H., & Phillips, O.L. (2012). Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 9(8), 3381–3403. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3381-2012>
- Gaudio, N., Gendre, X., Saudreau, M., Seigner, V., & Balandier, P. (2017). Impact of tree canopy on thermal and radiative microclimates in a mixed temperate forest: A new statistical method to analyse hourly temporal dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.010>
- Jacobs, M. (1962). *Pometia* (Sapindaceae), a study in variability. *Reinwardtia*, 6(2), 109–144.
- Jamnadass, R., McMullin, S., Iiyama, M., Dawson, I.K., Powell, B., Termote, C., Ickowitz, A., Kehlenbeck, K., Vinceti, B., van Vliet, N., Keding, G., Stadlmayr, B., van Damme, P., Carsan, S., Sunderland, T., Njenga, M., Gyao, A., Cerutti, P., Schure, J., Kouame, C., Obiri, B.O., Ofori, D., Agarwal, B., Neufeldt, H., Degrande, A., & Serban, A. (2015). *Understanding the roles of forests and tree-based systems in food provision*, dalam Vira, B., Wildburger, C., & Mansourian, S. (eds.), *Forests, trees and landscapes for food security and nutrition: A global assessment report* (p. 172). Vienna, Austria: IUFRO. <https://doi.org/10.11647/OBP.0085.01>
- Le Quéré, C., Andrew, R.M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A.C., Korsbakken, J.I., Peters, G.P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Boden, T.A., Tans, P.P., Andrews, O.D., Arora, V.K., Bakker, D.C.E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R.A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L.P., Ciais, P., Cosca, C.E., Cross, J., Currie, K., Gasser, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Houghton, R.A., Hunt, C.W., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A.K., Kato, E., Kautz, M., Keeling, R.F., Klein Goldewijk, K., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lima, I., Lombardozzi, D., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P.M.S., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., Padin, X.A., Peregón, A., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Reimer, J., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B.D., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F.N., Laan-Luijckx, I.T. van der, Werf, G.R. van der, Heuven, S. van, Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A.P., Watson, A.J., Wiltshire, A.J., Zaehele, S., & Zhu, D. (2018). Global carbon budget 2017. *Earth System Science Data*, 10(1), 405–448. <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>
- Lindenmayer, D. B., Laurance, W. F., & Franklin, J. F. (2012). Global decline in large old trees. *Science*, 338(6112), 1305–1306. <https://doi.org/10.1126/science.1231070>
- Lindenmayer, D.B., Laurance, W.F., Franklin, J.F., Likens, G.E., Banks, S.C., Blanchard, W., Gibbons, P., Ikin, K., Blair, D., McBurney, L., Manning, A.D., & Stein, J.A.R. (2014). New policies for old trees: Averting a global crisis in a keystone ecological structure. *Conservation Letters*, 7(1), 61–69. <https://doi.org/10.1111/conl.12013>
- Lutz, J.A., Furniss, T.J., Johnson, D.J., Davies, S.J., Allen, D., Alonso, A., Anderson - Teixeira, K.J., Andrade, A., Baltzer, J., Becker, K.M.L., Blomdahl, E.M., Bourg, N.A., Bunyavechewin, S., Burslem, D.F.R.P., Cansler, C.A., Cao, K., Cao, M., Cárdenas, D., Chang, L.-W., Chao, K.-J., Chao, W.-C., Chiang, J.-M., Chu, C., Chuyong, G.B., Clay, K., Condit, R., Cordell, S., Dattaraja, H.S., Duque, A., Ewango, C.E.N., Fischer, G.A., Fletcher, C., Freund, J.A., Giardina, C., Germain, S.J., Gilbert, G.S., Hao, Z., Hart, T., Hau, B.C.H., He, F., Hector, A., Howe, R.W., Hsieh, C.-F., Hu, Y.-H., Hubbell, S.P., Inman - Narahari, F.M., Itoh, A., Janík, D., Kassim, A.R., Kenfack, D., Korte, L., Król, K., Larson, A.J., Li, Y., Lin, Y., Liu, S., Lum, S., Ma, K., Makana, J.-R., Malhi, Y., McMahon, S.M., McShea, W.J., Memiaghe, H.R., Mi, X., Morecroft, M., Musili, P.M., Myers, J.A., Novotny, V., Oliveira, A. de, Ong, P., Orwig, D.A., Ostertag, R., Parker, G.G., Patankar, R., Phillips, R.P., Reynolds, G., Sack, L., Song, G.-Z.M., Su, S.-H., Sukumar, R., Sun, I.-F., Suresh, H.S., Swanson, M.E., Tan, S., Thomas, D.W., Thompson, J., Uriarte, M., Valencia, R., Vicentini, A., Vrška, T., Wang, X., Weiblen, G.D., Wolf, A., Wu, S.-H., Xu, H., Yamakura, T., Yap, S., & Zimmerman, J.K. (2018). Global importance of large-diameter trees. *Global Ecology and Biogeography*, 27(7), 849–864. <https://doi.org/10.1111/geb.12747>
- Marwiyati. (2012). *Ekologi vegetasi dan etnobotani kawasan karst Gunung Cibodas, Ciampea, Bogor*. Skripsi tidak diterbitkan, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia. Diakses dari <https://repository.ipb.ac.id/jspui/bitstream/123456789/60605/1/G12mar.pdf>
- Nugroho, H., Riyanto, A., Wiantoro, S., Santika, Y., & Irham, M. (Eds.). (2019). *Ekspedisi Tambrauw: Sepotong surga di tanah Papua*. Jakarta: LIPI Press. Diakses dari <http://penerbit.lipi.go.id/data/naskah1570087725.pdf>
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2005). *Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects*. Washington D.C.: Winrock International.
- Pertiwi, W., Bahri, S., Rokhim, S., & Firdhausi, N. F. (2020). Keanekaragaman dan pemerataan jenis *Collembola* gua di kawasan karst Malang Selatan. *Biotropic: The Journal of Tropical Biology*, 4(2), 6.

- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Diakses dari <https://www.R-project.org/>
- Ranlund, Å. (2011). *Structure and tree diversity of lowland limestone forest on Seram Island, Indonesia*. Thesis tidak diterbitkan, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden. Diakses dari https://stud.epsilon.slu.se/3720/1/ranlund_a_11122_0.pdf
- Réjou - Méchain, M., Tanguy, A., Piponiot, C., Chave, J., & Hérault, B. (2017). biomass: An r package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(9), 1163–1167. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12753>
- Rozak, A. H., Mutaqien, Z., & Destri. (2021). Biomass estimation of eaglewood (*Aquilaria filaria* (Oken) Merr.) in the karst ecosystem of West Papua. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 6(1), 59221. <https://doi.org/10.22146/jtbb.59221>
- Rozak, A. H., Rutishauser, E., Raulund-Rasmussen, K., & Sist, P. (2018). The imprint of logging on tropical forest carbon stocks: A Bornean case-study. *Forest Ecology and Management*, 417, 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.007>
- Rozak, A. H., Astutik, S., Mutaqien, Z., Widyatmoko, D., & Sulistyawati, E. (2017). Hiperdominansi jenis dan biomassa pohon di Taman Nasional Gunung Gede Pangrango, Indonesia. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 11(1), 85–96. <https://doi.org/10.22146/jik.24903>
- RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated Development for R*. Boston, USA: RStudio PBC. Diakses dari <http://www.rstudio.com/>
- Rutishauser, E., Noor'an, F., Laumonier, Y., Halperin, J., Rufi'ie, Hergoualc'h, K., Verchot, L. (2013). Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 307, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.013>
- Setiawan, A., Supriono, B., & Iskandar, S. (2018). Identifikasi keanekaragaman jenis fauna di Gua Garunggang. *Jurnal Nusa Sylva*, 18(2), 62–72.
- Slik, J. W. F. (2006). Estimating species-specific wood density from the genus average in Indonesian trees. *Journal of Tropical Ecology*, 22(04), 481. <https://doi.org/10.1017/S0266467406003324>
- Slik, J.W.F., Paoli, G., McGuire, K., Amaral, I., Barroso, J., Bastian, M., Blanc, L., Bongers, F., Boundja, P., Clark, C., Collins, M., Dauby, G., Ding, Y., Doucet, J.-L., Eler, E., Ferreira, L., Forshed, O., Fredriksson, G., Gillet, J.-F., Harris, D., Leal, M., Laumonier, Y., Malhi, Y., Mansor, A., Martin, E., Miyamoto, K., Araujo-Murakami, A., Nagamasu, H., Nilus, R., Nurtjahya, E., Oliveira, A., Onrizal, O., Parada-Gutierrez, A., Permana, A., Poorter, L., Poulsen, J., Ramirez-Angulo, H., Reitsma, J., Rovero, F., Rozak, A., Sheil, D., Silva-Espejo, J., Silveira, M., Spironelo, W., ter Steege, H., Stevart, T., Navarro-Aguilar, G.E., Sunderland, T., Suzuki, E., Tang, J., Theilade, I., van der Heijden, G., van Valkenburg, J., Van Do, T., Vilanova, E., Vos, V., Wich, S., Wöll, H., Yoneda, T., Zang, R., Zhang, M.-G., & Zweifel, N. (2013). Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics. *Global Ecology and Biogeography*, 22(12), 1261–1271. <https://doi.org/10.1111/geb.12092>
- Stas, S. M., Rutishauser, E., Chave, J., Anten, N. P. R., & Laumonier, Y. (2017). Estimating the aboveground biomass in an old secondary forest on limestone in the Moluccas, Indonesia: Comparing locally developed versus existing allometric models. *Forest Ecology and Management*, 389, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.12.010>
- Suhendar, A. S., Yani, E., & Widodo, P. (2018). Analisis vegetasi kawasan karst Gombong Selatan Kebumen Jawa Tengah. *Scripta Biologica*, 5(1), 37–40. <https://doi.org/10.20884/1.sb.2018.5.1.639>
- Syachrir, M., Subaedah, St., & Parawansa, A. K. (2018). Analisis komposisi jenis dan potensi simpanan karbon pada ekosistem karst di Resort Tondong Tallasa Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. *Jurnal Agrotek*, 2(2), 48–60. <https://doi.org/10.33096/agrotek.v2i2.61>
- Tamasuki, K., Wijayanti, F., & Fitriana, N. (2016). Komunitas kelelawar (Ordo Chiroptera) di beberapa gua karst Gunung Kendeng Kabupaten Pati Jawa Tengah. *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 8(2), 88–100. <https://doi.org/10.15408/kauniyah.v8i2.2694>
- Uhlig, H. (1980). Man and tropical karst in Southeast Asia: Geo-ecological differentiation, land use and rural development potentials in Indonesia and other Regions. *GeoJournal*, 4(1), 31–44. <https://doi.org/10.1007/BF00586753>
- Veress, M. (2020). Karst types and their karstification. *Journal of Earth Science*, 31(3), 621–634. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1306-x>
- Vermeulen, J. J., & Whitten, T. (1999). *Biodiversity And Cultural Property In The Management Of Limestone Resources: Lessons From East Asia*. Washington, D.C: World Bank.
- Wickham, H. (2009). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* [R]. New York: Springer-Verlag. Diakses dari <https://www.springer.com/gp/book/9780387981413>
- Widiyanti, P., & Kusmana, C. (2014). Komposisi jenis dan struktur vegetasi pada kawasan karst Gunung Bodas, Kecamatan Ciampea, Kabupaten Bogor. *Jurnal Silviculture Tropika*, 5(2), 69–76.
- Zaenal, M. S., Tiryana, T., & Muhdin. (2020). Model alometrik untuk estimasi biomassa pohon pada hutan lahan kering sekunder di Halmahera Timur. *Jurnal Wasian*, 7(2), 87–101. <https://doi.org/10.20886/jwas.v7i2.5948>
- Zanne, A.E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., Miller, R.B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C., & Chave, J. (2009). *Data from: Towards a Worldwide Wood Economics Spectrum*. Dryad Digital Repository. Diakses dari <https://doi.org/10.5061/dryad.234>