



# Berbicara SMAAC: Alat Baru untuk Mengukur Respirasi Tanah dan Aktivitas Mikroba

Ayush Joshi Gyawali\*, Brandon J. Lester dan Ryan D. Stewart

Sekolah Ilmu Tanaman dan Lingkungan, Virginia Tech, Blacksburg, VA, Amerika Serikat

Pengukuran respirasi tanah banyak digunakan untuk mengukur fluks karbon dan memastikan sifat biologis tanah yang terkait dengan ekologi mikroba tanah dan kesehatan tanah, namun metode saat ini untuk mengukur respirasi tanah membutuhkan peralatan yang mahal atau menggunakan pengukuran titik diskrit yang mungkin memiliki akurasi terbatas, dan mengabaikan respons yang mendasarinya. Untuk mengatasi kelemahan ini, kami mengembangkan pengatur murah untuk mengukur CO<sub>2</sub> yang disebut alat penilaian aktivitas mikroba tanah (SMAAC). Kami kemudian membandingkan SMAAC dengan unit penganalisis gas inframerah komersial (IRGA) dengan menganalisis tanah yang telah mengalami dua praktik pengelolaan yang berbeda: penyangga rumput vs. budidaya tanaman baris dengan pengolahan tanah. Perbandingan ini dilakukan dengan menggunakan tiga konfigurasi yang mendeteksi (1) respirasi tanah in situ, (2) uji ledakan CO<sub>2</sub>, dan (3) respirasi terinduksi substrat (SIR), ukuran biomassa mikroba aktif. SMAAC memberikan pembacaan yang konsisten dengan unit IRGA komersial untuk ketiga konfigurasi yang diuji, menunjukkan bahwa SMAAC dapat bekerja dengan baik sebagai alat yang murah namun akurat untuk mengukur respirasi tanah dan aktivitas mikroba.

## OPEN ACCESS

### Diedit oleh:

Rolf Pondok,

Universitas Teknologi Delft,  
Belanda

### Diperiksa oleh:

Ademir Araujo,

Universitas Federal Piauí, Brasil  
Claudio Mondini,  
Dewan Penelitian Pertanian  
dan Ekonomi, Italia

### \*Korespondensi:

Ayush Joshi Gyawali  
ayushg7@vt.edu

### Bagian khusus:

Artikel ini dikirimkan ke  
Proses Tanah,  
bagian dari jurnal  
Perbatasan dalam Ilmu Bumi

Diterima: 01 Maret 2019

Diterima: 15 Mei 2019

Diterbitkan: 29 Mei 2019

### Kutipan:

Joshi Gyawali A, Lester BJ and  
Stewart RD (2019) Berbicara tentang SMAAC:  
Alat Baru untuk Mengukur Tanah  
Respirasi dan Aktivitas Mikroba.  
Depan. Ilmu Bumi. 7:138.  
doi: 10.3389/feart.2019.00138

**Kata kunci:** respirasi terinduksi substrat, aktivitas mikroba tanah, kesehatan tanah, penginderaan lingkungan, CO<sub>2</sub> soil tanah

## PENGANTAR

Peningkatan respirasi tanah karena suhu yang lebih hangat dapat memperburuk perubahan iklim global (Rustad et al., 2000; Davidson dan Janssens, 2006; Bond-Lamberty et al., 2018), karena tanah saat ini memiliki aliran kotor 60 Gt C thn<sup>-1</sup> dan mewakili salah satu dari dua sumber fluks karbon terestrial terbesar. Menyerap lebih banyak karbon di tanah telah menjadi tujuan dari upaya mitigasi iklim, seperti inisiatif empat per seribu (Minasny et al., 2017), dan dengan penekanan khusus pada tanah yang telah terdegradasi oleh aktivitas manusia (Lal, 2004). Pengukuran respirasi tanah dapat membantu menginformasikan upaya penyerapan tersebut, sementara juga menyediakan sarana untuk memantau kesehatan, dan fungsi tanah pertanian (Mondini et al., 2010; Allen et al., 2011). Di laboratorium, pengukuran respirasi tanah digunakan untuk menginterpretasikan karakteristik mikroba tanah, misalnya menggunakan uji seperti SIR (Bradford et al., 2010), mineralisasi karbon (Song et al., 2014), dan profil respons katabolik (Casas et al., 2011).

Respirasi tanah sering dinilai dengan mengukur perubahan konsentrasi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dalam volume terkontrol selama beberapa periode waktu, dan bergantung pada sampel tempat atau pengukuran terintegrasi. Sampel spot sering dianalisis menggunakan teknik kromatografi gas (GC) (McGowen et al., 2018). Beberapa pengukuran GC juga dapat digabungkan untuk pengukuran terintegrasi. Namun, pengukuran GC ini bisa mahal, terutama

**Singkatan:** IRGA, penganalisis gas inframerah; SIR, respirasi yang diinduksi substrat; SMAAC, aktivitas mikroba tanah dan alat penilaian.

ketika banyak sampel yang diperlukan. Perangkat IRGA menyediakan pengukuran fluks terintegrasi, dan telah banyak digunakan untuk mengukur respirasi tanah di hutan (Gaudinski et al., 2000; Ladegaard-Pedersen et al., 2005; Don et al., 2009) dan ekosistem pertanian (Smukler et al., 2012).

Pengukuran berbasis IRGA juga telah digunakan untuk mempelajari komposisi komunitas mikroba (Fierer et al., 2003), yang merupakan salah satu sifat penting yang terkait dengan fungsi tanah (Mukhopadhyay et al., 2014).

Sementara perangkat berbasis IRGA menyediakan data fluks yang paling akurat (Rowell, 1995), sensor semacam itu seringkali mahal, menempatkannya di luar kemampuan banyak praktisi, dan intensif daya, membatasi kegunaannya di lapangan.

Pengukuran terpadu juga dapat dikumpulkan menggunakan titrasi kimia dengan kalium hidroksida, KOH, atau natrium hidroksida, NaOH (Haney RL et al., 2008). Meskipun metode titrasi sangat mudah dan dapat dilakukan tanpa perangkat yang mahal, ada kekhawatiran atas keakuratan proses titrasi (Haney R. et al., 2008). Metode-metode ini sering kali meremehkan respirasi tanah jika dibandingkan dengan pengukuran IRGA (Ferreira et al., 2018). Selain itu, metode titrasi seringkali membutuhkan tenaga kerja yang besar dan ruang laboratorium untuk melakukan.

Akhirnya, sampel spot dan sampel terintegrasi dapat dianalisis menggunakan teknik kolorimetri. Untuk sampel spot, tabung kolorimetri dapat digunakan (Patil et al., 2010), sedangkan dayung kolorimetri dapat memberikan pengukuran fluks terintegrasi (Sciarappa et al., 2016; Norris et al., 2018). Pengukuran mikro-respirasi, yang mengukur respirasi tanah dan profil fisiologis komunitas mikroba menggunakan pewarna indikator dalam gel agar, juga menggunakan teknik kolorimetri (Campbell et al., 2003; Renault et al., 2013). Meskipun unit pengambilan sampel individu relatif murah, bahannya tidak dapat digunakan kembali dan dengan cepat menjadi mahal karena jumlah sampel meningkat.

Untuk mengatasi kekurangan yang disebutkan di atas, kami menghadirkan perangkat pengukuran CO<sub>2</sub> berbasis Arduino dan berbasis IRGA yang murah, yang disebut alat penilaian aktivitas mikroba tanah (SMAAC). SMAAC memiliki fleksibilitas yang cukup besar, seperti yang kami tunjukkan menggunakan tiga konfigurasi berbeda: (1) SMAAC-Field, di mana perangkat tersebut digunakan untuk mengukur respirasi tanah dalam pengaturan lapangan; (2) SMAAC-Burst, di mana perangkat tersebut digunakan untuk menganalisis evolusi CO<sub>2</sub> pada pembasahan kembali tanah yang dikeringkan dengan udara secara cepat; dan (3) SMAAC-Biomass, dimana alat tersebut digunakan untuk mengukur SIR. Untuk memvalidasi konfigurasi ini, kami membandingkan pengukuran yang disediakan oleh SMAAC dengan pengukuran dari sistem IRGA portabel lapangan komersial. Contoh-contoh ini mengungkapkan bahwa SMAAC dapat bekerja dengan baik sebagai alat yang murah namun akurat untuk mengukur respirasi tanah.

## MATERIAL DAN METODE

### Alat Penilaian Aktivitas Mikroba Tanah (SMAAC)

**Deskripsi dan Kalibrasi** Komponen platform sensor (**Gambar 1**).

terdiri dari empat utama

(1) Arduino Uno (Arduino LLC, Ivrea, Italia).

(2) Adafruit Data Logger Shield (Adafruit Industries, New York, NY, Amerika Serikat).

(3) Sandbox Electronics 10.000 ppm CO<sub>2</sub> sensor (Sandbox Electronics, China).

(4) Sumber daya DC 5 V.

Arduino Uno adalah mikrokontroler open source/perangkat keras terbuka berdasarkan ATMEGA 328P. Ini tidak memiliki ruang penyimpanan atau kemampuan menjaga waktu yang akurat, sehingga pelindung data logger berisi jam waktu nyata (RTC) dan sirkuit tambahan untuk menyimpan data pada kartu SD yang dapat dilepas. SMAAC ditenagai menggunakan empat baterai AA 1,5 V. Konfigurasi ini menyediakan pembacaan hingga 21 jam dengan kecepatan 20 pembacaan per menit.

Sensor CO<sub>2</sub> hanya membutuhkan 4 kabel untuk berkomunikasi dengan Arduino (+V, RX, TX, dan Ground). Sensor menggunakan protokol serial I2C (Intra Integrated Circuit) dan menentukan konsentrasi CO<sub>2</sub> menggunakan non-dispersive infrared absorbance (NDIR).

Contoh kode untuk mengintegrasikan sensor ini dengan Arduino tersedia di <https://github.com/SandboxElectronics/NDIRZ16>.

Sensor CO<sub>2</sub> memiliki opsi untuk mengkalibrasi dirinya sendiri hingga 400 ppm CO<sub>2</sub> berdasarkan pembacaan di sekitar. Untuk memverifikasi bahwa kalibrasi orde pertama ini cukup akurat untuk penggunaan ilmiah, kami memeriksa akurasi sensor menggunakan standar CO<sub>2</sub> yang diketahui ( $n = 2$ ). Di sini, sensor dipasang melalui sumbat karet ke dalam tabung 1 L (**Gambar 2a**). Tabung diisi dengan udara bebas CO<sub>2</sub>, dan kemudian 0,1 L gas CO<sub>2</sub> 1000 ppm diganti di dalam tabung (memberikan konsentrasi 100 ppm di dalam tabung). Proses ini diulang untuk kedua kalinya dengan 1000 ppm CO<sub>2</sub> udara, dan juga dua kali masing-masing dengan 2000 dan 5000 ppm CO<sub>2</sub> udara (memberikan konsentrasi 200 dan 500 ppm di dalam toples). Hasil yang diperoleh dari SMAAC untuk standar ini dapat diulang dalam  $\pm 20$  ppm dan akurat dalam batas sensor  $\pm 50$  ppm.

## Deskripsi Tanah

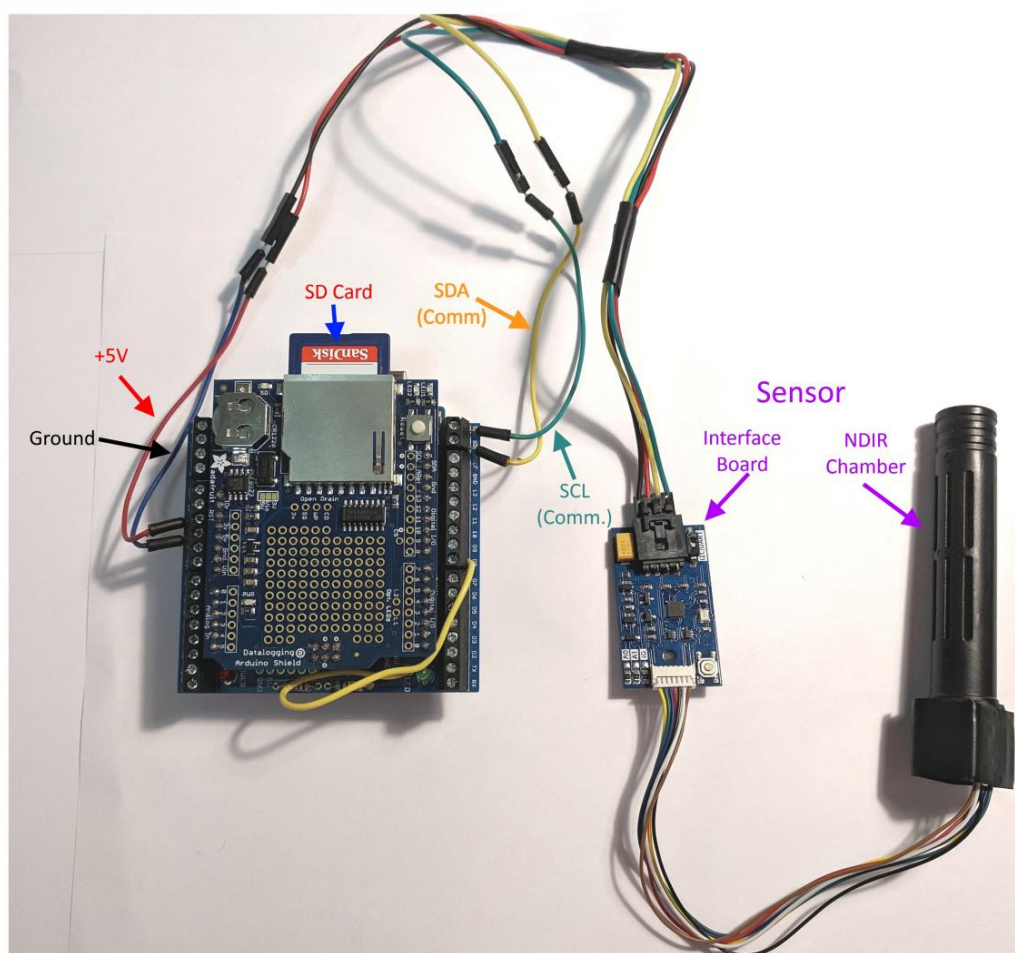
Kami menguji SMAAC dengan seri Weaver silt loam soil (Fine-loamy, mixed, active, and mesic Fluvaquent Eutrochets), berlokasi di Kentland Farm di Virginia Tech (37.198, -80.575).

Untuk memasukkan tingkat aktivitas mikroba tanah yang berbeda, kami mengambil sampel dua lokasi di ladang yang berdekatan yang dikelola menggunakan (1)utupan rumput abadi dan (2) budidaya tanaman baris dengan pengolahan moldboard. PH tanah yang tertutup rumput adalah 6,4 dan tanah yang digarap adalah 6,6, menempatkan tanah pada batas pH atas untuk melakukan pengukuran ruang statis [misalnya, West dan Sparling (1986) merekomendasikan pH 6,5]. Kami melakukan tiga tes di mana pengukuran SMAAC dibandingkan dengan unit IRGA mandiri yang tersedia secara komersial (LI-COR 8100 dengan ruang survei 8100-8103 berdiameter 20 cm, LI-COR, Lincoln, NE, Amerika Serikat): SMAAC-Field, SMAAC-Burst, dan SMAAC-Biomass.

### Pengukuran Lapangan dan Laboratorium Uji Respirasi Tanah

SMAAC-Field Kami menggunakan kolom PVC 200 mm

(diameter) kali 150 mm (tinggi) untuk pengukuran lapangan. Kami mengumpulkan pengukuran respirasi CO<sub>2</sub> 2 menit pertama menggunakan SMAAC yang terletak di dalam ruang pengambilan sampel LI COR 8100-8103 (yaitu, SMAAC-simultan);



**GAMBAR 1** | Skema alat penilaian aktivitas mikroba tanah (SMAAC). NDIR, sensor inframerah non-dispersif yang digunakan untuk mendeteksi CO<sub>2</sub>; SCL, jalur jam serial, digunakan untuk menyinkronkan data dan perintah antara Arduino dan papan antarmuka; SDA, jalur data serial, digunakan untuk mengirim dan menerima data serial dan perintah ke papan antarmuka.

**Gambar 2b).** Perhatikan bahwa ruang pengambilan sampel menyediakan segel kedap udara di sekitar kolom PVC selama pengukuran. Segera setelah pengukuran pertama ini, unit LI-COR dilepas dan cincin ditutup dengan tutup karet kedap udara (yaitu, independen SMAAC; **Gambar 2c**). SMAAC kemudian mengumpulkan pengukuran 2 menit kedua. Fluks CO<sub>2</sub> [ $f_{CO_2}$ ; (N<sub>2</sub> t<sup>-1</sup>)] adalah

diperkirakan sebagai:

$$f_{CO_2} = \frac{P_0 V_c}{RT_0 A} \frac{1C}{1t} \quad (1)$$

di mana P<sub>0</sub> adalah tekanan dalam ruang [M L<sup>-1</sup> t<sup>-1</sup> sama<sup>2</sup>], diasumsikan dengan tekanan atmosfer, V<sub>c</sub> adalah volume ruang pengambilan sampel ditambah pipa dan pompa [L<sup>3</sup>], R adalah konstanta hukum gas ideal [M L<sup>2</sup> N<sub>2</sub> t<sup>-1</sup> T], T<sub>0</sub> adalah suhu udara [T], A adalah luas area pengambilan sampel [L<sup>2</sup>], konsentrasi CO<sub>2</sub> pada basis molar [N<sub>2</sub> t<sup>-1</sup>] per perubahan waktu 1t [t].

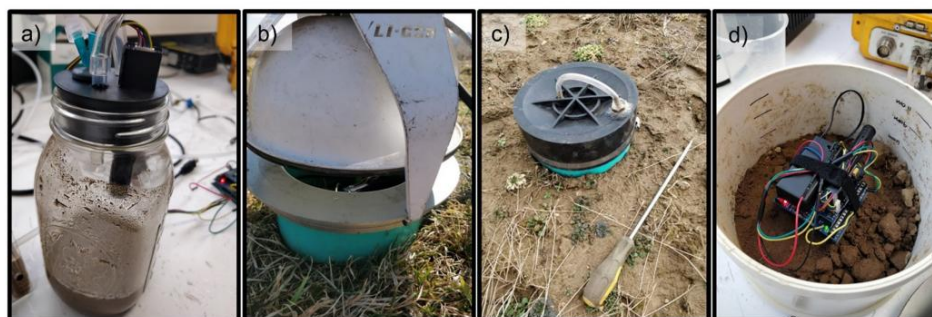
Empat cincin diambil sampelnya untuk masing-masing tanah yang tertutup rumput dan tanah yang digarap (n = 4).

#### Uji CO<sub>2</sub> Semburan SMAAC Untuk

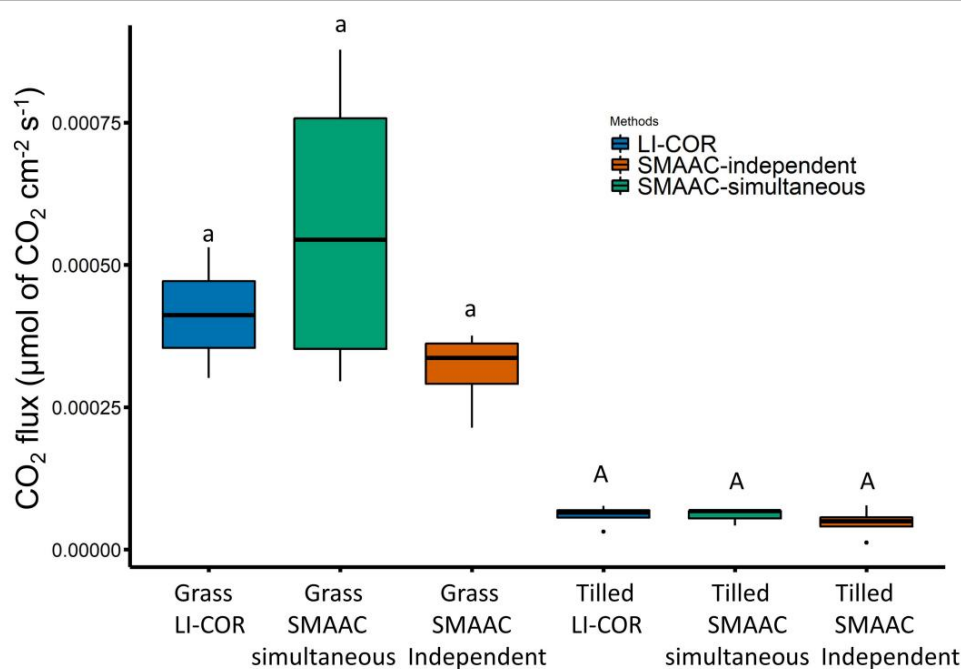
uji ledakan CO<sub>2</sub>, kami menempatkan 200 g tanah yang diayak 4 mm dan dikeringkan di udara dari dua lokasi ke dalam kolom berdiameter 200 mm dengan tinggi 150 mm. Kapasitas menahan air untuk setiap sampel tanah diukur dengan menggunakan metode corong (Fierer et al., 2006). Air ditambahkan setetes demi setetes ke masing-masing sampel tanah menggunakan spuit sampai sampel mencapai kapasitas menahan air 50%. Setelah sampel tanah dibasahi, SMAAC ditempatkan di permukaan tanah (**Gambar 2d**). Tudung sampel LI-COR 8100 kemudian ditempatkan di atas. Kedua instrumen mengumpulkan bacaan beberapa kali dalam satu menit selama minimal 2 jam. Untuk setiap instrumen, pembacaan yang dikumpulkan dirata-ratakan per menit untuk keperluan grafik (n = 4 per tanah).

#### SMAAC-Biomass Substrate Induced Respiration (SIR)

Kami juga membandingkan pengukuran LI-COR 8100 dan SMAAC selama pengujian yang dirancang untuk meniru pengukuran SIR (Fierer et al., 2003; Strickland et al., 2010). Sampel tanah yang didinginkan dari ladang dibawa ke suhu kamar semalaman. Kami menempatkan 80 g (massa kering ekuivalen) sampel tanah yang diayak berukuran 4 mm ke dalam a



**GAMBAR 2** | Pengaturan pengukuran untuk: (a) pengukuran respirasi terinduksi substrat (SIR) SMAAC-Biomass; (b) Pengukuran fluks medan-SMAAC dengan SMAAC secara bersamaan ditempatkan di dalam ruang pengambilan sampel LI-COR 8100; (c) pengukuran fluks medan SMAAC dengan SMAAC independen dari unit LI-COR; dan (d) Pengukuran ledakan CO<sub>2</sub> laboratorium SMAAC-Burst.



**GAMBAR 3** | Fluks CO<sub>2</sub> diukur di lapangan dengan LI-COR (biru), SMAAC-simultan (hijau), dan SMAAC-independen (oranye). Huruf kecil yang berbeda menunjukkan bahwa fluks tanah yang tertutup rumput berbeda secara statistik; huruf kapital yang berbeda menunjukkan fluks tanah yang digarap berbeda secara statistik (ANOVA dengan Tukey's HSD; P < 0,05).

Botol kaca 1 L (**Gambar 2a**). Kami kemudian menambahkan 0,16 L larutan ragi terautolisis yang dibuat dari 12 g ekstrak ragi (BD Biosciences, San Jose, CA, Amerika Serikat) dalam 1 L air DI sebagai substrat. Campuran tanah dan substrat dikocok tanpa penutup selama 10 menit.

Kami kemudian menyegel toples menggunakan sumbat karet yang memiliki sensor SMAAC dan septum yang dipasang melaluinya. Menggunakan septum, kami membilas ruang kepala toples menggunakan udara bebas CO<sub>2</sub> selama 7 menit. Kemudian toples dipertahankan pada 20°C selama 4 jam. Setelah 4 jam, kami mengumpulkan sampel gas melalui septum menggunakan jarum suntik. Sampel ini disuntikkan ke dalam unit LI-COR 8100 untuk mengukur konsentrasi CO<sub>2</sub> di ruang kepala tabung. Pembacaan CO<sub>2</sub> 4 jam dari SMAAC juga dianalisis. Kedua pengukuran headspace CO<sub>2</sub> dikonversi ke satuan SIR (μg C g<sup>-1</sup> tanah kering h<sup>-1</sup>) berdasarkan massa kering tanah. Tiga ulangan

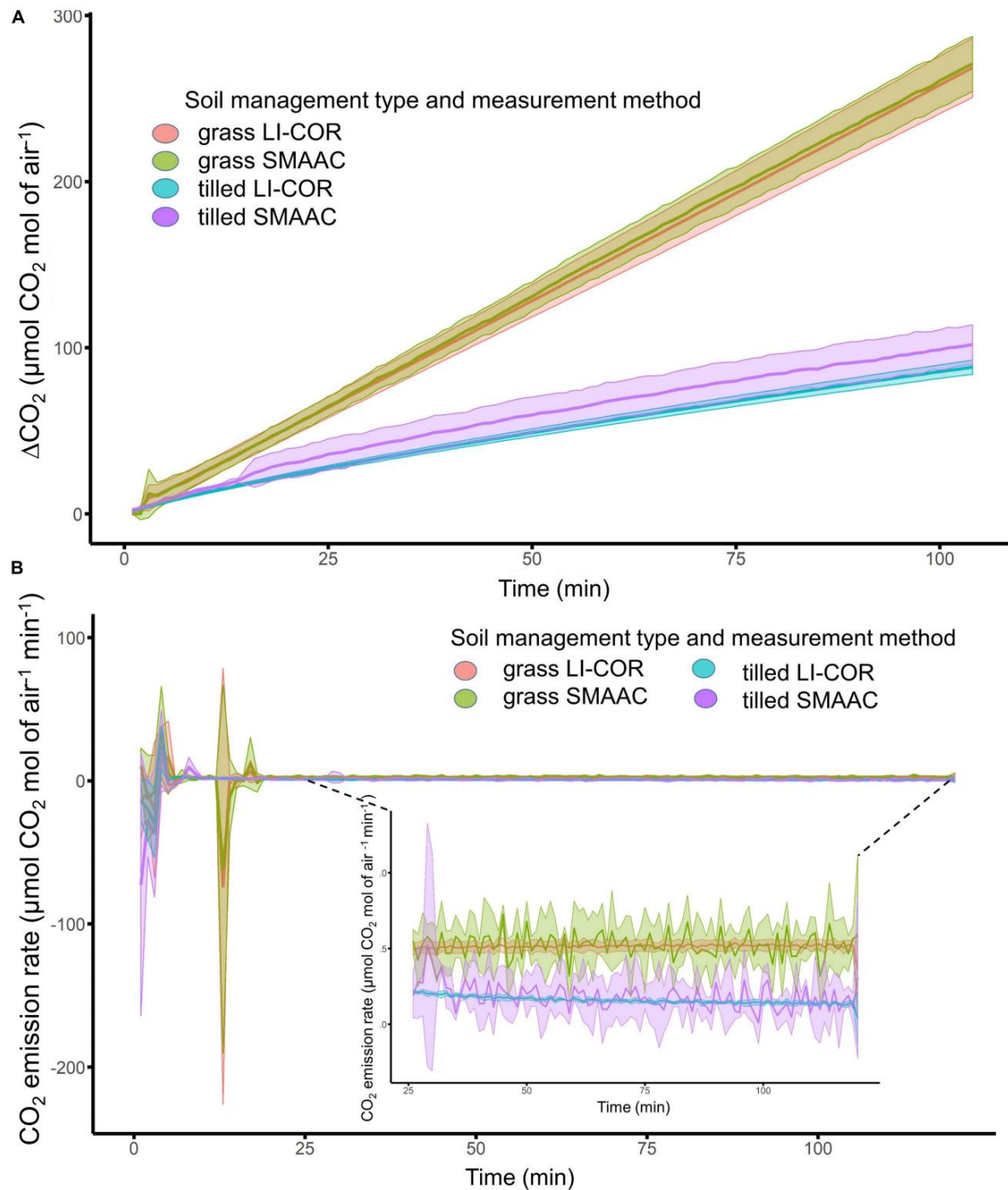
dianalisis untuk penyangga rumput dan tanah yang dibajak dengan moldboard (n = 3).

#### Analisis Statistik

Semua analisis statistik dan angka dilakukan dalam R Versi 3.5.0 (Tim Inti Pengembangan R., 2018). Analisis varians (ANOVA) digunakan untuk membandingkan tiga jenis pengukuran yang dilakukan dalam konfigurasi SMAAC-Field (yaitu, LI-COR, SMAAC-simultan, dan SMAAC-independen). Selama tes SMAAC-Burst dan SMAAC-Biomass, uji-t Student digunakan untuk membandingkan hasil dari LI-COR vs SMAAC.

Pengukuran dianalisis secara terpisah untuk tanah yang tertutup rumput dan tanah yang digarap. = 0,05 digunakan untuk menguji signifikansi selama penelitian ini.





**GAMBAR 4 | (A)** Pengukuran laboratorium terhadap perubahan CO<sub>2</sub> melalui waktu (menit) untuk tanah yang ditumbuhi rumput dan digarap, diukur menggunakan LI-COR 8100, dan konfigurasi SMAAC-Burst. Garis solid mewakili nilai rata-rata, dan area yang diarsir mewakili standar deviasi dari rata-rata. **(B)** Laju emisi CO<sub>2</sub> untuk tanah yang ditumbuhi rumput dan digarap, diukur dengan menggunakan LI-COR, dan konfigurasi SMAAC-Burst.

## HASIL

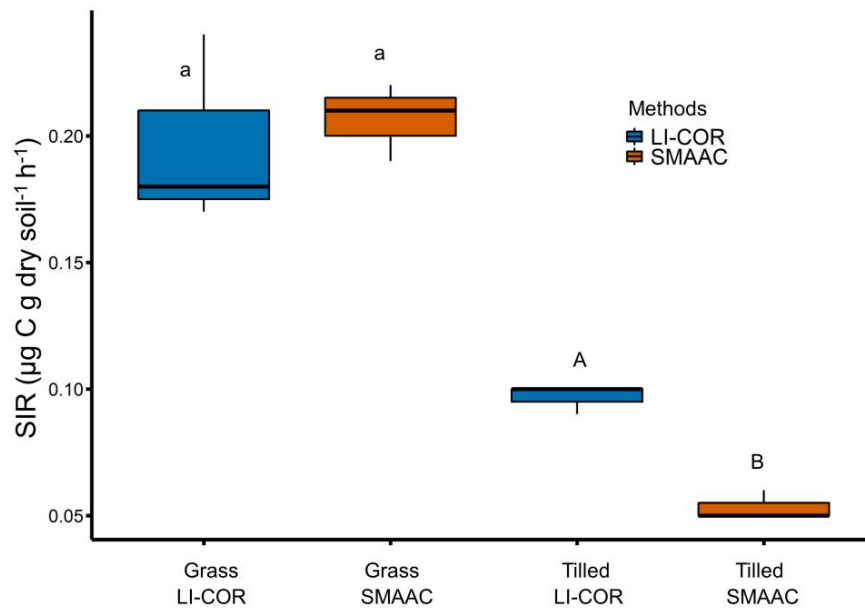
### Tes Respirasi Tanah Lapangan SMAAC

Untuk tes respirasi SMAAC-Field, LI-COR 8100 dan

SMAAC digunakan untuk mengukur fluks CO<sub>2</sub> selama periode 2 menit, dengan

SMAAC ditempatkan di dalam (SMAAC-simultan) dan tanpa (SMAAC-independent) ruang pengambilan sampel LI-COR.

Kedua instrumen menunjukkan bahwa tanah yang ditumbuhi rumput memiliki fluks CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi daripada tanah yang digarap (**Gambar 3**). Fluks diukur untuk tanah penyangga rumput dengan LI-COR ( $4,1 \times 10^4 \text{ mol}$



**GAMBAR 5** | Respirasi yang diinduksi substrat diukur dengan LI-COR 8100 (biru) vs. konfigurasi SMAAC-Biomass (oranye). Huruf kecil yang berbeda menunjukkan bahwa fluks tanah yang tertutup rumput berbeda secara statistik; huruf kapital yang berbeda menunjukkan bahwa fluks tanah yang digarap berbeda secara statistik (Uji-t Siswa;  $P < 0,05$ ).

$\text{CO}_2 \text{ cm}^2 \text{ s} \pm 9,9 \times 10^5$  standar deviasi, SD) tidak berbeda secara signifikan dari fluks yang ditentukan melalui SMAAC simultan ( $5,6 \times 10^4 \text{ mol CO}_2 \text{ cm}^2 \text{ s} \pm 2,7 \times 10^4 \text{ SD}$ ) atau SMAAC- independen ( $3,1 \times 10^4 \text{ mol CO}_2 \text{ cm}^2 \text{ s} \pm 1,9 \times 10^5 \text{ SD}$ ). Untuk tanah yang digarap, fluks LI COR ( $5,9 \times 10^5 \text{ mol CO}_2 \text{ cm}^2 \text{ s} \pm 1,9 \times 10^5 \text{ SD}$ ) sekali lagi tidak berbeda secara signifikan dari fluks yang diukur selama SMAAC-simultan ( $5,9 \times 10^5 \text{ mol CO}_2 \text{ cm}^2 \text{ s} \pm 1,9 \times 10^5 \text{ SD}$ ) dan SMAAC-independen ( $4,7 \times 10^5 \text{ mol CO}_2 \text{ cm}^2 \text{ s} \pm 2,6 \times 10^5 \text{ SD}$ ).

g tanah kering<sup>1</sup>  $\pm 0,01 \text{ SD}$ ) pengukuran tidak secara statistik jam berbeda untuk tanah yang tertutup rumput ( $P > 0,05$ ). Namun, nilai LI COR SIR ( $0,09 \text{ g C g tanah kering}^{-1} \text{ jam} \pm 0,005 \text{ SD}$ ) untuk tanah yang digarap signifikan lebih tinggi daripada nilai SMAAC SIR ( $0,05 \text{ g C g tanah kering}^{-1} \text{ jam} \pm 0,005 \text{ SD}$ ;  $P = 0,0009$ ).

## DISKUSI

Dalam penelitian ini kami mengembangkan tiga konfigurasi sensor  $\text{CO}_2$  berbasis Arduino yang memungkinkan kami untuk menilai aktivitas mikroba tanah. Instrumen kami, yang dianggap sebagai SMAAC, kemudian dibandingkan dengan unit IRGA komersial (LI-COR 8100). Secara keseluruhan, SMAAC menghasilkan hasil yang serupa dengan IRGA komersial, dengan perbedaan yang signifikan hanya diamati ketika SIR dikuantifikasi untuk tanah yang digarap (Gambar 5). Dalam contoh ini, nilai SIR dari konfigurasi SMAAC-Biomass kira-kira setengah dari nilai yang diperkirakan oleh LI-COR. Alasan perbedaan mungkin berhubungan dengan keakuratan sensor SMAAC IRGA (50 ppm per pabrik). Meskipun analisis kalibrasi kami menentukan bahwa instrumen memberikan pembacaan yang konsisten untuk konsentrasi  $\text{CO}_2$  antara 100 dan 500 ppm, akurasi sensor menyiratkan bahwa kesalahan dapat melebihi 10% untuk konsentrasi  $\text{CO}_2 < 500 \text{ ppm}$ . Oleh karena itu, menggunakan sensor untuk mengukur konsentrasi  $\text{CO}_2$  yang rendah mungkin memerlukan tindakan pencegahan ekstra seperti menggunakan waktu pengoperasian yang lebih lama, jumlah ulangan yang lebih banyak, dan kalibrasi yang lebih sering. Kami juga mencatat bahwa kami tidak menguji sensor melebihi 1.000 ppm, jadi kalibrasi juga harus dinilai saat menggunakan SMAAC untuk mengukur konsentrasi  $\text{CO}_2$  yang lebih tinggi.

SMAAC cenderung menunjukkan lebih banyak noise pengukuran daripada LI-COR saat menilai fluks  $\text{CO}_2$ , misalnya fluks medan

### SMAAC-Burst $\text{CO}_2$ Burst Test Konfigurasi SMAAC-

Burst menghasilkan hasil yang konsisten dibandingkan dengan unit LI-COR 8100 untuk tanah yang tertutup rumput dan tanah yang digarap (Gambar 4), dengan nilai rata-rata dan standar deviasi yang sama dihitung dari empat ulangan fisik untuk setiap tanah (Gambar 4A). Kami mengamati fluktuasi yang relatif besar dalam tingkat emisi  $\text{CO}_2$ , terutama selama 20 menit pertama percobaan (Gambar 4B). Setelah periode awal ini, tingkat emisi  $\text{CO}_2$  lebih berfluktuasi untuk SMAAC dibandingkan dengan LICOR, meskipun tingkat rata-rata umumnya konsisten antar metode (Gambar 4B). Kedua instrumen menunjukkan bahwa semburan  $\text{CO}_2$  lebih besar pada tanah yang ditumbuhi rumput dibandingkan dengan tanah yang digarap (Gambar 4).

### Hasil Uji Respirasi Terinduksi Substrat SMAAC-Biomass Hasil

yang dihasilkan dengan menggunakan LI-COR 8100 dan Biomassa SMAAC secara konsisten menunjukkan bahwa tanah yang ditumbuhi rumput memiliki nilai SIR yang lebih tinggi daripada tanah yang digarap (Gambar 5). LI-COR ( $0,19 \text{ g C g tanah kering}^{-1} \text{ jam} \pm 0,03 \text{ SD}$ ) dan SMAAC ( $0,21 \text{ g C}$

pengukuran dari penyiapan SMAAC-simultan vs. LI-COR di tanah yang tertutup rumput (**Gambar 3**), atau tingkat emisi yang dihitung untuk kedua tanah dengan SMAAC-Burst (**Gambar 4B**). Namun, selama pengukuran fluks lapangan, uji SMAAC-independen memiliki fluks median yang sedikit lebih rendah dan standar deviasi yang lebih kecil daripada LI-COR atau SMAAC-simultan. Hasil ini mungkin mencerminkan pengaruh unit pompa LI-COR, yang menyediakan

sirkulasi udara terus menerus di dalam ruangan. Pada saat yang sama, perhitungan fluks kami (Persamaan 1) mengasumsikan bahwa volume udara,  $V_c$ , untuk pengaturan simultan LI-COR dan SMAAC sama dengan ruang pengambilan sampel LI-COR ditambah volume pompa LI-COR. Hal ini dapat menimbulkan kesalahan karena volume pompa LI-COR berbeda-beda dari tanah yang ditempati oleh SMAAC itu sendiri, sehingga berpotensi memasukkan kesalahan kecil ke dalam perhitungan fluks untuk pengujian tersebut. Kami juga mencatat di sini bahwa SMAAC dan LI-COR keduanya menunjukkan variabilitas emisi yang tinggi selama 20 menit awal percobaan uji ledakan CO<sub>2</sub>. Hasil ini mungkin mencerminkan periode ekuilibrasi di dalam toples kaca, terutama sebagai respons terhadap gangguan tanah awal selama membasahi tanah dan menutup sistem.

Total biaya SMAAC adalah \$150, membuatnya setidaknya dua kali lipat lebih murah daripada unit IRGA komersial. Meskipun biayanya rendah, SMAAC masih mempertahankan akurasi yang wajar dalam ketiga konfigurasi yang diuji, dan melakukan pengukuran berulang jika dibandingkan dengan standar CO<sub>2</sub>. SMAAC lebih ringan dan membutuhkan lebih sedikit daya daripada unit IRGA komersial, meningkatkan kegunaannya saat melakukan pengukuran yang diperluas atau bekerja di lokasi terpencil. Manfaat tambahan SMAAC berasal dari faktor bentuknya yang kecil: dapat ditempatkan langsung di dalam ruang sampel, sehingga menghilangkan kebutuhan untuk menarik sampel gas terpisah menggunakan jarum suntik. Menghapus langkah ini menghilangkan potensi sumber kesalahan, terutama karena banyak unit pompa IRGA komersial tidak sepenuhnya disegel.

SMAAC dapat membuka jalan baru penyelidikan terkait dengan pengukuran respirasi tanah, baik dalam hal konfigurasi yang ditunjukkan di sini maupun konfigurasi lain yang mungkin belum dikembangkan. Misalnya, kami memfokuskan pengujian kami pada pengukuran ruang tertutup, karena biasanya digunakan untuk mengevaluasi fluks CO<sub>2</sub> tanah, dan melakukan pengukuran seperti SIR. Pengukuran ruang tertutup juga cocok untuk perbandingan langsung dengan unit IRGA komersial. Namun, CO<sub>2</sub> juga dapat diukur dengan menggunakan sistem terbuka (Norman et al., 1997; Alterio et al., 2006) atau di ruang yang terus-menerus disiram (Chow et al., 2006). Menggunakan SMAAC dalam sistem terbuka/dibersihkan dengan demikian mewakili area pengembangan yang mungkin di masa depan.

Demikian pula, karena sistem SMAAC tidak mahal dan mudah dipasang, beberapa sensor dapat digunakan secara bersamaan untuk mengukur variabilitas spasial dan temporal yang lebih baik dalam pengukuran biologis tanah, misalnya dengan menganalisis beberapa ruang secara bersamaan dan dengan demikian menyediakan fungsionalitas yang sama seperti unit multiplekser yang sering ditawarkan dengan IRGA komersial. Terakhir, pencatatan langsung evolusi CO<sub>2</sub> secara terus menerus selama pengukuran dapat membantu menghasilkan wawasan baru. Misalnya, tanah yang ditumbuhi rumput vs. tanah yang digarap menunjukkan tren temporal yang berbeda dalam uji SMAAC-Burst (**Gambar 4B**), di mana tanah yang tertutup rumput menghasilkan laju penghabisan CO<sub>2</sub> yang konstan selama periode pengujian 2 jam.

vs. penurunan laju penghabisan CO<sub>2</sub> untuk tanah yang digarap. Sementara mekanisme yang mendasari mengendalikan respons yang berbeda ini tetap berada di luar cakupan makalah saat ini, namun perlu dicatat bahwa tidak mungkin mengamati tren seperti itu tanpa frekuensi pengukuran tinggi yang ditawarkan oleh instrumen berbasis IRGA seperti SMAAC.

## KESIMPULAN

SMAAC yang dikembangkan dalam penelitian ini merupakan cara yang murah namun andal untuk mengukur fluks CO<sub>2</sub> dari tanah. Hasil yang diperoleh dari SMAAC konsisten dengan hasil dari unit IRGA komersial untuk pengukuran lapangan dan laboratorium. Dalam studi ini kami menyoroti tiga konfigurasi SMAAC yang dirancang untuk menilai berbagai aspek aktivitas dan fungsi mikroba tanah, namun SMAAC juga memiliki potensi untuk menghasilkan aplikasi dan wawasan tambahan.

Sebagai contoh, dengan menempatkan unit SMAAC-Burst dan SMAAC Biomass ditempatkan di dalam headspace tertutup di atas sampel, kami menghasilkan pengukuran evolusi CO<sub>2</sub> yang hampir terus menerus sepanjang waktu. Tren CO<sub>2</sub> seperti itu dapat memberikan pemahaman baru tentang proses mikroba tanah yang tidak mungkin dilakukan melalui pengukuran diskrit tradisional. Kesimpulannya, SMAAC adalah alat yang menjanjikan untuk mengukur respirasi tanah dan aktivitas mikroba yang menjamin penggunaan oleh komunitas ilmiah yang lebih luas.

## KETERSEDIAAN DATA

Data mentah yang mendukung kesimpulan dari naskah ini akan disediakan oleh penulis, tanpa syarat yang tidak semestinya, kepada peneliti yang memenuhi syarat.

## KONTRIBUSI PENULIS

AJG berkontribusi dalam merancang dan melakukan eksperimen, melakukan analisis, dan menulis draf pertama naskah. BL berkontribusi dalam pembuatan sensor, melakukan eksperimen, dan mengedit naskah. RS berkontribusi dalam menghasilkan ide utama, memberikan panduan selama eksperimen dan analisis, serta menulis dan mengedit naskah.

## PENDANAAN

Karya ini disediakan oleh Hibah Inovasi Konservasi NRCS Departemen Pertanian AS # 69-3A75-14-260

dan juga sebagian disediakan oleh US Department of Agriculture National Resources Conservation Service Stasiun Percobaan Pertanian Virginia dan Hatch Program of the National Institute of Food and Agriculture, US

Departemen Pertanian. Kami juga ingin berterima kasih kepada dana Subvensi Akses Terbuka Virginia Tech atas dukungannya terkait biaya publikasi.

## REFERENSI

- Allen, DE, Singh, BP, dan Dalal, RC (2011). Indikator kesehatan tanah di bawah perubahan iklim: tinjauan pengetahuan saat ini. *Kesehatan Tanah Clim. Mengubah.* 29, 25–45. doi: 10.1007/978-3-642-20256-8\_2
- Alterio, G., Giorio, P., dan Sorrentino, G. (2006). Ruang sistem terbuka untuk pengukuran pertukaran gas di tingkat pabrik. *Mengepung. Sci. teknologi.* 40, 1950–1955. doi: 10.1021/es052094o
- Bond-Lamberty, B., Bailey, VL, Chen, M., Gough, CM, dan Vargas, R. (2018). Respirasi heterotrofik tanah yang meningkat secara global selama beberapa dekade terakhir. *Alam* 560, 80–83. doi: 10.1038/s41586-018-0358-x
- Bradford, MA, Watts, BW, dan Davies, CA (2010). Adaptasi termal respirasi tanah heterotrofik dalam mikrokosmos laboratorium. *Gumpal. Ganti Biol.* 16, 1576–1588. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02040.x
- Campbell, CD, Chapman, SJ, Cameron, CM, Davidson, MS, dan Potts, JM (2003). Metode pelat mikrotiter cepat untuk mengukur karbon dioksida berevolusi dari perubahan substrat karbon sehingga dapat menentukan profil fisiologis komunitas mikroba tanah dengan menggunakan tanah utuh. *aplikasi Mengepung. Mikrobiol.* 69, 3593–3599. doi: 10.1128/aem.69.6.3593-3599.2003
- Casas, C., Omacini, M., Montecchia, MS, dan Correa, OS (2011). Respon komunitas mikroba tanah terhadap jamur endofit *Neotyphodium* di ryegrass Italia. *Tanam Tanah* 340, 347–355. doi: 10.1007/s11104-010-0607-8
- Chow, AT, Tanji, KK, Gao, S., and Dahlgren, RA (2006). Suhu, kadar air dan efek siklus basah-kering pada produksi DOC dan mineralisasi karbon di tanah gambut pertanian. *Biola Tanah. Biokimia.* 38, 477–488. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.06.05
- Davidson, EA, dan Janssens, IA (2006). Sensitivitas suhu dekomposisi karbon tanah dan umpan balik terhadap perubahan iklim. *Alam* 440:165. doi: 10.1038/alam04514
- Don, A., Rebmann, C., Kolle, O., Scherer-Lorenzen, M., dan Schulze, ED (2009). Dampak perubahan pengelolaan terkait aforestasi pada keseimbangan karbon padang rumput. *Gumpal. Ganti Biol.* 15, 1990–2002. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01873.x
- Ferreira, CRPC, Antonino, ACD, Sampaio, EVDSB, Correia, KG, Lima, JRDS, Soares, W., dkk. (2018). Pengukuran penghabisan CO<sub>2</sub> tanah dengan penyerapan alkali dan penganalisis gas inframerah di wilayah semi-kering brazilian. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42:e0160563.
- Fierer, N., Colman, BP, Schimel, JP, dan Jackson, RB (2006). Memprediksi ketergantungan suhu respirasi mikroba di tanah: analisis skala benua. *Gumpal. Biogeokimia. Siklus* 20:GB3026.
- Fierer, N., Schimel, JP, dan Holden, PA (2003). Variasi komposisi komunitas mikroba melalui dua profil kedalaman tanah. *Biola Tanah. Biokimia.* 35, 167–176. doi: 10.1016/s0038-0717(02)00251-1
- Gaudinski, JB, Trumbore, SE, Davidson, EA, dan Zheng, S. (2000). Siklus karbon tanah di hutan beriklim sedang: perkiraan waktu tinggal berbasis radiokarbon, tingkat penyerapan dan pembagian fluks. *Biogeokimia* 51, 33-69.
- Haney, R., Brinton, W., dan Evans, E. (2008). Respirasi CO<sub>2</sub> tanah: perbandingan titrasi kimia. Analisis CO<sub>2</sub> IRGA dan sistem gel Solvita. *Memperbarui. Agri. makanan sys.* 23, 171-176. doi: 10.1017/s174217050800224x
- Haney, RL, Brinton, W., dan Evans, E. (2008). Memperkirakan mineralisasi karbon, nitrogen, dan fosfor tanah dari respirasi karbon dioksida jangka pendek. *komuni. Ilmu Tanah. dan Anus Tumbuhan.* 39, 2706–2720. doi: 10.1080/00103620802358862
- Ladegaard-Pedersen, P., Elberling, B., dan Vesterdal, L. (2005). Cadangan karbon tanah, laju mineralisasi, dan pengeluaran CO<sub>2</sub> di bawah 10 spesies pohon pada jenis tanah yang kontras. *Bisa. J. Hutan Res.* 35, 1277–1284. doi: 10.1139/x05-045 Lal, R. (2004). Penyerapan karbon tanah berdampak pada perubahan iklim global dan ketahanan pangan. *Sains* 304, 1623–1627. doi: 10.1126/science.1097396
- McGowen, EB, Sharma, S., Deng, S., Zhang, H., dan Warren, JG (2018). Metode laboratorium otomatis untuk mengukur emisi CO<sub>2</sub> dari tanah. *Agri. Mengepung. Lett.* 3, 2-3. doi: 10.2134/ael2018.02.0008
- Minasny, B., Malone, BP, McBratney, AB, Angers, DA, Arrouays, D., Chambers, A., dkk. (2017). Karbon tanah 4 per mil. *Geoderma* 292, 59–86. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.263
- Mondini, C., Sinicco, T., Cayuela, ML, dan Sanchez-Monedero, MA (2010). Sistem otomatis sederhana untuk mengukur respirasi tanah dengan kromatografi gas. *Talanta* 81, 849–855. doi: 10.1016/j.talanta.2010.01.026
- Mukhopadhyay, S., Maiti, S., dan Mastro, R. (2014). Pengembangan indeks kualitas tanah tambang (MSQI) untuk evaluasi keberhasilan reklamasi: studi kronologis. *Ekol. Ind.* 71, 10-20. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.07.001
- Norman, J., Kucharik, C., Gower, S., Baldocchi, D., Crill, P., Rayment, M., et al. (1997). Perbandingan enam metode untuk mengukur fluks karbon dioksida permukaan tanah. *J. Geofisika. Res. atmosfer.* 102, 28771–28777. doi: 10.1029/97jd0140
- Norris, R., Chim, BK, Evanylo, G., Reiter, M., dan Thomason, W. (2018). penilaian tes nitrogen tanah di musim untuk jagung yang ditanam ke tanaman penutup tahunan musim dingin. *Ilmu Tanah. Perkumpulan Saya.* J.82, 1428–1436.
- Patil, RH, Colls, JJ, dan Steven, MD (2010). Efek gas CO<sub>2</sub> sebagai kebocoran dari lokasi penyimpanan geologis pada agroekosistem. *Energi* 35, 4587–4591. doi: 10.1016/j.energi.2010.01.023
- Tim Inti Pengembangan R. (2018). Bahasa dan Lingkungan untuk Statistik Komputasi. Austria: R Foundation untuk Komputasi Statistik.
- Renault, P., Ben-Sassi, M., dan Berard, A. (2013). Meningkatkan metode respirasi yang diinduksi substrat MicroResp dengan deskripsi perilaku CO<sub>2</sub> yang lebih lengkap dalam sumur inkubasi tertutup. *Geoderma* 207, 82–91. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.05.010
- Rowell, MJ (1995). Metode kolorimetri untuk pengukuran CO<sub>2</sub> dalam tanah. *Biola Tanah. Biokimia.* 27, 373–375. doi: 10.1016/0038-0717(94)00218-p
- Rustad, LE, Huntington, TG, dan Boone, RD (2000). Kontrol pada respirasi tanah: implikasi untuk perubahan iklim. *Biogeokimia* 48, 1–6. doi: 10.1111/gcb.13308
- Sciarappa, W., Murphy, S., Quinn, V., Barresi, R. dan Ward, D. (2016). Menilai kesehatan tanah di blueberry highbush dengan tes respirasi Solvita CO<sub>2</sub>. *Akta Hortik.* 1180, 327-334
- Smukler, S., O'Geen, A., dan Jackson, L. (2012). Penilaian praktik manajemen terbaik untuk siklus nutrisi: Studi kasus di pertanian organik di iklim tipe Mediterania. *J. Konservasi Air Tanah.* 67, 16–31. doi: 10.2489/jswc.67.1.16
- Lagu, Y., Lagu, C., Tao, B., Wang, J., Zhu, X., dan Wang, X. (2014). Tanggapan jangka pendek dari aktivitas enzim tanah dan mineralisasi karbon untuk menambahkan nitrogen dan serasah di rawa air tawar di Cina Timur Laut. *eur. J. Biol Tanah.* 61, 72-79. doi: 10.1016/j.ejsobi.2014.02.001
- Strickland, MS, Devore, JL, Maerz, JC, dan Bradford, MA (2010). Invasi rumput di hutan kayu keras dikaitkan dengan penurunan sumber karbon di bawah tanah. *Gumpal. Ganti Biol.* 16, 1338-1350. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02042.x
- Barat, A., dan Sparling, G. (1986). Modifikasi metode respirasi yang diinduksi substrat untuk memungkinkan pengukuran biomassa mikroba di tanah dengan kadar air yang berbeda. *J. Mikrobiol. Metode* 5, 177–189. doi: 10.1016/0167-7012(86)90012-6

**Pernyataan Konflik Kepentingan:** Para penulis menyatakan bahwa penelitian dilakukan tanpa adanya hubungan komersial atau keuangan yang dapat ditafsirkan sebagai potensi konflik kepentingan.

Hak Cipta © 2019 Joshi Gyawali, Lester dan Stewart. Ini adalah artikel akses terbuka yang didistribusikan di bawah ketentuan Lisensi Atribusi Creative Commons (CC BY). Penggunaan, distribusi atau reproduksi di forum lain diperbolehkan, asalkan penulis asli dan pemilik hak cipta dikreditkan dan publikasi asli dalam jurnal ini dikutip, sesuai dengan praktik akademik yang diterima. Penggunaan, distribusi, atau reproduksi tidak diizinkan yang tidak sesuai dengan persyaratan ini.