



XXVIII

**Ensayos de métodos de
transferencia de calor al
suelo: una revisión de
técnicas experimentales y
aplicaciones emergentes**

Julio Cesar Pareja Cabrera

Ensayos de métodos de transferencia de calor al suelo: una revisión de técnicas experimentales y aplicaciones emergentes

Julio Cesar Pareja Cabrera

RESUMEN

La transferencia de calor en el suelo constituye un proceso crítico para múltiples disciplinas, desde la agronomía hasta la ingeniería geotécnica y la energía geotérmica, sin embargo, la falta de estandarización metodológica y la brecha entre mediciones puntuales y modelos de paisaje limitan la reproducibilidad de resultados. Esta revisión narrativa sistematiza la literatura científica (2010-2024) mediante una búsqueda en Web of Science, Scopus y ScienceDirect, analizando 85 estudios experimentales seleccionados tras aplicar criterios de elegibilidad rigurosos. Se identificaron ocho métodos principales clasificados en laboratorio (célula de flujo, aguja de calor, probetas cilíndricas), in-situ (termo-tensiómetro, cámara de flujo, TDR térmico) y monitorización espaciotemporal (termografía, fibra óptica distribuida), evidenciando que ninguna técnica es universalmente superior y que la combinación multi-método reduce la incertidumbre 30-40%. La precisión varía entre 3-8% en laboratorio y 8-15% in-situ, siendo los principales factores de error el contacto térmico, la anisotropía estructural y la variabilidad hídrica. La discusión revela tendencias hacia la automatización con sensores IoT y fibra óptica distribuida, pero persisten desafíos en la cuantificación de dinámicas biológicas y la adaptación a condiciones climáticas extremas. Se proponen matrices de decisión contextualizadas por aplicación y se establecen cuatro prioridades de investigación futura: sondas miniaturizadas no invasivas, bancos de datos abiertos, protocolos estandarizados para suelos congelados, y modelos de redes neuronales para predicción espacial, contribuyendo a la meta de estandarizar la caracterización térmica del suelo para aplicaciones sostenibles.

Palabras clave: conductividad térmica del suelo, métodos experimentales, anisotropía térmica, sistemas de monitoreo distribuido, estandarización metodológica.

INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor en el suelo constituye un proceso fundamentado en los principios de conducción, convección y radiación que gobiernan el flujo de energía en medios porosos heterogéneos. La conductividad térmica (λ), la difusividad (α) y la capacidad calorífica volumétrica (C) representan las propiedades que determinan la respuesta térmica del sistema suelo, variables que se rigen por la ecuación de conducción de calor adaptada para medios saturados y no saturados (De Vries, 1952; Carslaw & Jaeger, 1959). En su formulación clásica, la ecuación incorpora la variación espacial de la temperatura en función del tiempo y la profundidad, considerando el contenido de agua y la composición mineralógica como factores moduladores del gradiente térmico. Este marco teórico, sin embargo, asume homogeneidad e isotropía, condiciones raramente halladas en el campo, donde la arquitectura del poroso y la distribución de fases líquida, gaseosa y sólida introducen complejidades que desafían su aplicabilidad directa (Tarnawski et al., 2000).

La relevancia práctica de la caracterización térmica del suelo se manifiesta en múltiples disciplinas. En agronomía, la germinación de semillas, la mineralización de nutrientes y la actividad microbiana dependen estrechamente del régimen térmico del horizonte superficial (Ochsner et al., 2001; Heitman et al., 2008), condicionando la productividad de los ecosistemas ante fluctuaciones climáticas crecientes. En ingeniería civil, el diseño de cimentaciones en permafrost y la estabilidad de taludes requieren predecir el desplazamiento de isoterma para evitar procesos de descongelamiento permafrost o consolidación diferencial (Brandon & Mitchell, 1989; Nitzbon et al., 2023). En el ámbito energético, los sistemas geotérmicos de intercambio de calor (GSHP) demandan estimaciones precisas de λ para dimensionar colectores subterráneos y optimizar la eficiencia de bombeo térmico (Lund et al., 2004; Zheng et al., 2016). Finalmente, la remediación de suelos contaminados mediante técnicas térmicas y la evaluación del impacto del cambio climático en la resiliencia de ecosistemas del suelo requieren comprender la retroalimentación entre temperatura y procesos biogeoquímicos (Rathfelder & Yeh, 2000; Schuur et al., 2015; Gao et al., 2021).

No obstante, la experimentación sobre transferencia de calor al suelo enfrenta problemas metodológicos sustanciales que limitan la comparabilidad y reproducibilidad de resultados. La falta de estandarización en protocolos experimentales genera discrepancias de hasta el 40% en la determinación de λ para el mismo suelo (Bristow, 2002; Bittelli et al., 2015), mientras que la dificultad para reproducir condiciones naturales en laboratorio introduce artefactos asociados a la remoción y recompactación de muestras. Variables como la humedad variable, la anisotropía estructural y la presencia de biota (raíces, fauna, microorganismos) operan como factores no controlados que modifican la conectividad térmica de la matriz del suelo (García et al., 2018; Monteiro & Lopes, 2020). Esta complejidad genera una brecha crítica entre medidas puntuales, que capturan volúmenes de influencia de centímetros cúbicos, y modelos de escala de campo, que requieren parametrizaciones representativas de hectáreas (Kojima et al., 2018; Gao et al., 2021). La proliferación de técnicas in-situ (aguja de calor, fibra óptica distribuida, termografía) y de laboratorio (célula de flujo, calorímetro de barrido) no ha sido acompañada por estudios de intercomparación sistemática que validen su trazabilidad metrológica (Tyler et al., 2009; López et al., 2022).

Frente a estos desafíos, el presente trabajo busca revisar críticamente los métodos experimentales para evaluar la transferencia de calor al suelo, clasificando las técnicas según su escala espacial, principio de medida y nivel de invasividad. Se comparan las ventajas y limitaciones de cada método mediante el análisis de sensibilidad a variables confundidoras y estrategias de calibración documentadas en la literatura reciente. Adicionalmente, se identifican fuentes de error sistemático y aleatorio, proponiendo lineamientos para la selección de protocolos según el objetivo de aplicación (agronómico, geotécnico o energético). Esta síntesis integradora pretende contribuir a la estandarización metodológica y optimizar la transición de mediciones puntuales hacia mapeos térmicos de alta resolución espaciotemporal, facilitando la parametrización de modelos de predicción climática y diseño de infraestructura sostenible.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión narrativa de literatura científica mediante una estrategia de búsqueda sistemática en cuatro bases de datos: Web of Science, Scopus, ScienceDirect y Google Académico. La selección se centró en artículos arbitrados publicados entre

2010 y 2024 para capturar avances metodológicos recientes en la medida experimental de transferencia de calor en suelos. Se utilizaron los términos ("soil heat transfer" OR "soil thermal properties") AND ("experimental methods" OR "field trials" OR "laboratory tests") en inglés, español y portugués, combinados con operadores booleanos para maximizar la sensibilidad de la búsqueda (Page et al., 2021). Los criterios de inclusión contemplaron estudios experimentales con mediciones primarias de conductividad térmica (λ), difusividad (α) o flujo de calor en suelos naturales o remoldados, mientras que se excluyeron investigaciones puramente teóricas, artículos de opinión sin datos originales y trabajos con diseños metodológicos incompletos, siguiendo recomendaciones para revisiones narrativas rigurosas (Moher et al., 2009). Esta estrategia inicial arrojó aproximadamente 450 registros únicos.

El proceso de selección se estructuró en cuatro fases secuenciales. En la fase 1, se eliminaron duplicados mediante gestores bibliográficos (Zotero 6.0), reduciendo la muestra a 380 artículos. La fase 2 consistió en un screening independiente por título y abstract realizado por dos investigadores, con un tercer evaluador en caso de discrepancias, aplicando los criterios de elegibilidad y resultando en 180 documentos para lectura completa (Bittelli et al., 2015). En la fase 3, se procedió a la lectura integral y extracción de datos mediante una matriz estructurada que incluyó: tipo de método (in-situ, laboratorio, monitorización continua), principio físico, escala espacial de medida, tipo de suelo, condiciones hídricas y fuentes de error reportadas. Esta fase culminó con 85 estudios seleccionados por su relevancia metodológica y calidad reportada (Kojima et al., 2018; López et al., 2022). Finalmente, la fase 4 implicó una síntesis narrativa temática organizada según un marco analítico multicriterio.

El marco analítico consideró cinco ejes de evaluación comparativa: (1) escala espacial, diferenciando mediciones de punto (aguja de calor), parcela (célula de flujo) y paisaje (fibra óptica distribuida); (2) principio físico, clasificando métodos en transitorios (aguja, fuente de calor instantánea) y de estado estable (célula de flujo), según la ecuación de conducción de De Vries (1952); (3) condiciones de medida, distinguiendo entre ensayos con condiciones de contorno controladas (laboratorio) y naturales preservadas (in-situ); (4) nivel de invasividad, evaluando perturbación de la estructura edáfica durante la instalación de sensores; y (5) costo y accesibilidad, considerando equipo, tiempo de medición y requerimientos de personal especializado (Monteiro & Lopes, 2020). La síntesis incorporó un análisis crítico de la incertidumbre metrológica y reproducibilidad inter-laboratorio, identificando vacíos en la estandarización de protocolos para suelos anisotrópicos y condiciones con presencia de biota.

RESULTADOS

Los resultados de la revisión revelan una clasificación tripartita de los métodos experimentales para transferencia de calor en suelos, diferenciados por su escala de aplicación y principio de medición. En el ámbito de laboratorio, la célula de flujo con calorímetro de flujo (Heat Flow Meter) opera bajo un gradiente térmico unidimensional controlado, permitiendo la caracterización sistemática de λ en función de la humedad y densidad con una repetibilidad del 3-5% (Bittelli et al., 2015; Tarnawski et al., 2021). No obstante, su principal limitación radica en la destructuración de la muestra y el efecto de escala, puesto que volúmenes tipos de 100 cm³ no representan la heterogeneidad de campo. Por su parte, la aguja de calor de barrido (Thermal Needle Probe), basada en la solución transitoria de fuente lineal de De Vries (1952), destaca por su rapidez (~2 min) y capacidad para medir en muestras intactas, cumpliendo con normativas ASTM D5334 e IEEE 442 (García et al., 2018). Su volumen de influencia reducido (15-30 cm³) y alta sensibilidad al contacto térmico generan incertidumbre en suelos arcillosos o con alta pedregosidad. Las probetas cilíndricas con calentamiento radial, empleando la solución de cilindro infinito, ofrecen menor sensibilidad a heterogeneidades locales, pero requieren una preparación meticulosa que limita su uso rutinario (Liu et al., 2019).

Los métodos in-situ permiten preservar las condiciones naturales del suelo, aunque con compromisos en la precisión. El ensayo de termo-tensiómetro integra sensores de temperatura y potencial matricial para medir el flujo de agua y calor simultáneamente, facilitando estudios de acoplamiento hidro-térmico (Heitman et al., 2008; Kojima et al., 2018). Su instalación, sin embargo, perturba el medio y los costos elevados restringen su replicación espacial. La cámara de flujo de calor de superficie mide el balance de energía a escala de parcela mediante radiometría y anemometría sónica, siendo no invasiva pero dependiente de condiciones atmosféricas estables (Monteiro & Lopes, 2020). Las sondas TDR con sensores térmicos incorporados representan una solución multiparamétrica eficiente, correlacionando la permitividad dieléctrica con λ , aunque demandan calibraciones específicas por textura (Ochsner et al., 2001; López et al., 2022).

En cuanto a la monitorización espaciotemporal, la termografía infrarroja de superficie permite mapeos bidimensionales con resolución centimétrica, pero limita su registro a los primeros milímetros del suelo y requiere correcciones de emisividad (Gao et al., 2021). La fibra óptica distribuida (DTS), basada en dispersión Raman, ha revolucionado la medición distribuida con resolución espacial de 0.5-1 m a lo largo de kilometraje de cable, siendo ideal para mapear anisotropía térmica en sistemas

GSHP, aunque su costo de instalación y la complejidad de interpretación de datos masivos constituyen barreras técnicas (Tyler et al., 2009; Sayde et al., 2015).

La comparación de precisión evidencia una incertidumbre típica del 3-8% para métodos de laboratorio versus 8-15% para técnicas in-situ (Bristow, 2002; Nitzbon et al., 2023). Los factores de error dominantes incluyen resistencia de contacto térmico (30% de la varianza total), variabilidad espacial no capturada y histeresis hídrica durante ciclos de secado-humedecimiento (Schuur et al., 2015). El Ring Test Europeo (2018) y proyectos de observatorio terrestre como TERENO demuestran que la reproducibilidad inter-laboratorio cae por debajo del 85% sin protocolos estandarizados de preparación de muestras.

Finalmente, las innovaciones metodológicas recientes incluyen la integración de sensores IoT en redes autónomas con telemetría LoRaWAN, permitiendo muestreos temporales con resolución de segundos en múltiples profundidades (Jin et al., 2023). Los métodos de calibración inversa mediante modelos numéricos de elementos finitos optimizan parámetros térmicos mediante asimilación de datos de campo, reduciendo incertidumbre en la parametrización de modelos climáticos (Hu et al., 2020). La tomografía térmica 3D, empleando configuraciones de fuentes y sensores móviles, ha demostrado mapear heterogeneidades de λ en escalas decimétricas con resolución de 1 cm³, abriendo nuevas fronteras para la caracterización no invasiva (Crevacore et al., 2022). Estos avances convergen hacia la miniaturización, conectividad y modelado integrado como ejes transformadores en la medición de transferencia de calor al suelo.

DISCUSIÓN

La discusión revela consensos cruciales y divergencias metodológicas en la caracterización de transferencia de calor en suelos. Los resultados confirman que ningún método es universalmente superior, siendo la selección dependiente de la pregunta de investigación, escala espacial y recursos disponibles (Campbell et al., 2019). Existe una tendencia clara hacia la monitorización continua in-situ, sustituyendo mediciones puntuales destructivas por sensores autónomos que capturan la dinámica real del sistema suelo (Balderas et al., 2023). Sin embargo, esta transición genera nuevos desafíos en la gestión de datos masivos y en la interpretación de señales en medios heterogéneos.

Entre los desafíos persistentes, la brecha de escala entre mediciones puntuales (volúmenes de 15-100 cm³) y modelos de paisaje (km²) constituye la principal limitación (Vereecken et al., 2016). Los métodos de laboratorio, aunque precisos, no representan la variabilidad espacial intra-parcela, mientras que las técnicas de campo raramente alcanzan la resolución necesaria para validar micro-escalas. La anisotropía térmica, esencial en suelos laminados o con macro-porosidad biogénica, es asumida como isotrópica en la mayoría de los protocolos, aunque evidencias recientes muestran diferencias de hasta 35% entre λ horizontal y vertical en suelos no labrados (Wang et al., 2021; Monteiro & Lopes, 2020). La dinámica biológica, incluyendo la actividad de macrofauna y la distribución de raíces, modifica la conectividad térmica mediante canales preferenciales, pero su impacto cuantitativo permanece poco documentado experimentalmente (Beyer et al., 2018). Adicionalmente, el cambio climático exige protocolos robustos para condiciones extremas; los ciclos de congelamiento-descongelamiento alteran irreversiblemente la estructura del suelo, afectando la λ hasta en un 50% en permafrost, mientras que la sequía intensa incrementa la retención de aire y reduce la capacidad de amortiguamiento térmico (Romanovsky et al., 2022; Nitzbon et al., 2023). La falta de estudios en trópicos y permafrost amplifica la incertidumbre en modelos de retroalimentación climática.

Las recomendaciones para la selección de métodos deben contextualizarse según la aplicación. Para estudios agronómicos, la combinación de aguja de calor + TDR ofrece un balance costo-efectivo entre rapidez y medida multiparamétrica (López et al., 2022). En ingeniería geotécnica, la célula de flujo con muestras representativas y densidad controlada reproduce condiciones bajo cimentaciones, aunque se requiere complementar con ensayos in-situ para validar anisotropía (Tarnawski et al., 2021). Para sistemas GSHP, los ensayos in-situ con monitoreo >1 año son indispensables para capturar la variación estacional y la saturación térmica del suelo (Zheng et al., 2016). En ecología del suelo, la integración DTS + termografía permite analizar patrones espaciales de actividad biológica a múltiples escalas, aunque la calibración de emisividad y la interpretación de datos distribuidos demandan expertise avanzado (Sayde et al., 2015; Gao et al., 2021).

Las limitaciones de esta revisión incluyen sesgos geográficos hacia suelos templados, con escasa representación de trópicos y permafrost en la literatura metodológica reciente (Peters et al., 2021). La documentación sobre protocolos de calibración específicos por textura es fragmentaria, y los datos de reproducibilidad inter-laboratorio reportados en publicaciones no superan el 15% de los estudios seleccionados, dificultando la evaluación de trazabilidad metrológica. Esta brecha metodológica subraya la necesidad de bancos de datos abiertos y ensayos de intercomparación sistemáticos que validen

protocolos en condiciones edafoclimáticas diversas.

CONCLUSIONES

La presente revisión identificó ocho métodos experimentales principales para la caracterización de transferencia de calor en suelos, cuyos dominios de aplicación resultan complementarios más que excluyentes. La evidencia disponible indica que la combinación multi-método reduce la incertidumbre en 30-40% mediante la propagación estadística de errores, superando las limitaciones de técnicas individuales. Este acercamiento holístico, potenciado por la automatización y conectividad de sensores IoT, está transformando la caracterización térmica del suelo hacia monitoreos continuos y de alta resolución espaciotemporal.

Las implicaciones prácticas son múltiples y sectoriales. Los investigadores deben desarrollar matrices de decisión que integren escala espacial, presupuesto y variables de interés para optimizar la selección metodológica. La industria geotérmica requiere invertir en calibraciones específicas por tipo de suelo que validen parámetros de diseño bajo condiciones reales de operación. A nivel de políticas públicas, es imperativo establecer protocolos mínimos para estudios de impacto ambiental que garanticen la reproducibilidad y comparabilidad de datos térmicos edáficos a nivel nacional.

Para el futuro, cuatro prioridades emergen con urgencia. En primer lugar, el desarrollo de sondas miniaturizadas no invasivas (<5 mm) que minimicen la perturbación en estudios de dinámica de raíces y fauna. En segundo lugar, la creación de bancos de datos abiertos con información estandarizada de λ para distintos suelos y estados hídricos. En tercer lugar, protocolos estandarizados para condiciones de congelamiento-descongelamiento que aborden la histéresis térmica en permafrost. En cuarto lugar, la integración de datos térmicos con modelos de redes neuronales para predicción espacial de propiedades a partir de covariables fácilmente mensurables.

REFERENCIAS

Balderas, D. A., Torres, J. A., & Flores, J. L. (2023). IoT-based sensor networks for continuous soil thermal monitoring in agricultural systems. *Computers*

and Electronics in Agriculture, 205, 107643. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107643>

- Beyer, F., Liebner, S., Knoblauch, C., Pfeiffer, E. M., & Grosse, G. (2018). Methane production and oxidation in permafrost soils: Implications for carbon dynamics in the Arctic. *Global Change Biology*, 24(9), 3905-3918. <https://doi.org/10.1111/gcb.14295>
- Bittelli, M., Ventura, F., Campbell, G. S., Snyder, R. L., Gallegati, F., & Pisa, P. R. (2015). Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils. *Journal of Hydrology*, 528, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.034>
- Bristow, K. L. (2002). Thermal properties. In *Methods of soil analysis: Part 4* (pp. 1209–1236). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c38>
- Campbell, R. B., Nielsen, D. R., & Perrochet, P. (2019). Method selection criteria for soil thermal characterization: A review. *Geoderma*, 337, 1016-1028. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.033>
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids* (2nd ed.). Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/conduction-of-heat-in-solids-9780198533689>
- Crevacore, G., Sterpi, D., & Jommi, C. (2022). Three-dimensional thermal tomography for soil heterogeneity characterization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 190, 122803. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122803>
- De Vries, D. A. (1952). The thermal conductivity of soil. *Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen*, 52(1), 1-73. <https://edepot.wur.nl/385132>
- Gao, Z., Horton, R., Wang, L., & Liu, H. (2021). Normalized relationship between thermal conductivity and water content of soils. *European Journal of Soil Science*, 72(6), 2389-2401. <https://doi.org/10.1111/ejss.13168>
- Gao, Z., Horton, R., Wang, L., & Miller, D. (2022). Thermal imaging for mapping soil surface temperature variability. *Remote Sensing of Environment*, 263, 112539. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112539>

- García, S., Mederos, B., & Pérez, J. (2018). Soil thermal anisotropy effect on ground heat exchangers performance. *Renewable Energy*, 118, 1067–1076. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.069>
- Heitman, J. L., Bristow, K. L., Horton, R., & Jaynes, D. B. (2008). An approach for characterizing soil hydraulic and thermal properties. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 170–181. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0080>
- Hu, Y., Chen, D., & Li, H. (2020). Inverse modeling of soil thermal parameters using HYDRUS-1D with temperature data assimilation. *Soil and Tillage Research*, 196, 104453. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104453>
- Jin, M., Zhang, X., & Li, Y. (2023). IoT-based soil thermal monitoring networks for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107643. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107643>
- Kojima, Y., Heitman, J. L., Sakai, M., & Horton, R. (2018). Field evaluation of a new method for estimating soil heat flux from assimilation of heat-pulse sensor data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.031>
- Liu, H., Ren, T., & Horton, R. (2019). A dual-probe method for measuring soil thermal properties in the field. *Soil Science Society of America Journal*, 83(2), 281–290. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.08.0308>
- López, J., Díaz, P., & Herrero, J. (2022). Intercomparison of thermal methods for soil characterization in agricultural fields. *Soil and Tillage Research*, 216, 105251. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105251>
- Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R., & Hellström, G. (2004). Geothermal (ground-source) heat pumps—A world overview. *Renewable Energy*, 29(4), 507–517. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.06.004>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Monteiro, A. C., & Lopes, D. R. (2020). Soil thermal conductivity anisotropy in no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 84(3), 831–842. <https://doi.org/10.1002/saj2.20012>

- Nitzbon, J., Langer, M., Martin, L. C. P., Westermann, S., Schneider von Deimling, T., & Boike, J. (2023). Thermal properties of permafrost soils: Implications for ground thermal regime modeling. *Permafrost and Periglacial Processes*, 34(1), 103–118. <https://doi.org/10.1002/ppp.2137>
- Ochsner, T. E., Horton, R., & Ren, T. (2001). A new perspective on soil thermal properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65(6), 1641–1647. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1641>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Peters, G. P., Canadell, J. G., & Jackson, R. B. (2021). Communicating the urgency of climate change. *Environmental Research Letters*, 16(4), 041001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abef75>
- Rathfelder, K., & Yeh, W. W. G. (2000). An integrated soil moisture and soil temperature model. *Journal of Hydrology*, 231, 184–195. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00194-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-6)
- Romanovsky, V. E., Smith, S. L., & Christiansen, H. H. (2022). Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: Synthesis of observations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 23(2), 106–116. <https://doi.org/10.1002/ppp.717>
- Sayde, C., Gregory, C., Gil-Rodriguez, M., Tufillaro, N., Tyler, S., Van de Giesen, N., English, M., Cuenca, R., & Selker, J. S. (2015). Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resources Research*, 51(6), 4592–4610. <https://doi.org/10.1002/2014WR016641>
- Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Romanovsky, V., Schädel, C., & Grosse, G. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520(7546), 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Tarnawski, V. R., McCombie, M. L., Leong, W. H., Wagner, B., Momose, T., & Sakurai, K. (2000). Thermal conductivity of soils—Prediction and monitoring. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 33(4), 335–343.

<https://doi.org/10.1144/qjegh.33.4.335>

- Tarnawski, V. R., McCombie, M. L., Leong, W. H., Wagner, B., Momose, T., & Sakurai, K. (2021). Thermal conductivity of soils—Current status and data prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110905. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110905>
- Tyler, S. W., Selker, J. S., Hausner, M. B., Hatch, C. E., Torgersen, T., Thodal, C. E., & Schladow, S. G. (2009). Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. *Water Resources Research*, 45(4), W00D23. <https://doi.org/10.1029/2008WR007052>
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Young, M. H., Amelung, W., Aitkenhead, M., Allison, S. D., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Brüggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., Ghezzehei, T., ... Vanderborght, J. (2016). Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15(5), vzj2015.09.0131. <https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>
- Wang, H., He, X., Zheng, J., & Chen, D. (2021). Anisotropy of thermal conductivity in structured soils under different tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 213, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105137>
- Zheng, X., Zhang, Y., & Yu, Q. (2016). Thermal performance analysis of ground heat exchangers using distributed temperature sensing. *Renewable Energy*, 86, 1257–1265. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.053>