

Caparrós Santiago, J.; Jeannet Chaves, G.; Rodríguez Galiano, V. Análisis comparativo de productos globales de fenología de la superficie terrestre derivados de MODIS, VIIRS y OLCI frente a observaciones in situ de despliegue foliar de la red PEP725

# Análisis comparativo de productos globales de fenología de la superficie terrestre derivados de MODIS, VIIRS y OLCI frente a observaciones in situ de despliegue foliar de la red PEP725

Caparrós Santiago, José Antonio <sup>1</sup> Jeannet Chaves, Guilhem Nicolás <sup>1</sup> Rodríguez Galiano, Víctor <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla

ORCID: Caparrós Santiago 0000-0003-3369-8356 Jeannet Chaves 0000-0002-6824-4840 Rodríguez Galiano 0000-0002-5422-8305

Correspondencia: [jacaparros@us.es](mailto:jacaparros@us.es) [gjeannet@us.es](mailto:gjeannet@us.es) [vrgaliano@us.es](mailto:vrgaliano@us.es)

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la coherencia entre las fechas del inicio de la estación de crecimiento (Start Of Season; SOS) derivadas de los productos fenológicos globales MCD12Q2, VNP22Q2 y CLMS LSP y las fechas del primer despliegue foliar registradas mediante observaciones humanas in situ de la red fenológica PEP725 para 2023. Las fechas del SOS se agregaron espacialmente mediante zonas de influencia (buffer) alrededor de cada estación fenológica y se emparejaron con las fechas medianas del primer despliegue foliar por grupos funcionales de vegetación, evaluando su relación mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo medio. En frondosas caducifolias, el SOS del producto CLMS LSP mostró la mayor coherencia con las observaciones in situ ( $R = 0,56$ ; RMSE = 15 días; MAE = 13 días; sesgo = 10 días). En coníferas caducifolias, todos los productos alcanzaron correlaciones similares ( $R \approx 0,61$ ), aunque el SOS del VNP22Q2 registró las menores discrepancias con las observaciones del primer despliegue foliar (RMSE = 16 días; MAE = 13 días; sesgo medio = -10 días). En coníferas perennifolias, el SOS derivado de MCD12Q2 y VNP22Q2 alcanzó correlaciones elevadas con las observaciones in situ ( $R = 0,70-0,82$ ), pero los errores y el sesgo fueron muy altos (RMSE, MAE y sesgo  $\geq 36$  días). En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que no existe un producto universalmente superior y subrayan la necesidad de validar los datos fenológicos derivados de satélite mediante observaciones independientes para una interpretación ecológica más robusta de las fenométricas.



**Palabras clave:** Fenología de la vegetación; Validación; Fenométricas; Europa.


Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

# Análisis comparativo de productos globales de fenología de la superficie terrestre derivados de MODIS, VIIRS y OLCI frente a observaciones in situ de despliegue foliar de la red PEP725

Caparrós Santiago, José Antonio <sup>(1)</sup>, Jeannet Chaves, Guilhem Nicolás <sup>(1)</sup>, Rodríguez Galiano, Víctor <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla.

 0000-0003-3369-8356, jacaparrros@us.es ;  0000-0002-6824-4840, gjeannet@us.es

 0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es

**Resumen:** El objetivo de este estudio fue evaluar la coherencia entre las fechas del inicio de la estación de crecimiento (Start Of Season; SOS) derivadas de los productos fenológicos globales MCD12Q2, VNP22Q2 y CLMS LSP y las fechas del primer despliegue foliar registradas mediante observaciones humanas *in situ* de la red fenológica PEP725 para 2023. Las fechas del SOS se agregaron espacialmente mediante zonas de influencia (buffer) alrededor de cada estación fenológica y se emparejaron con las fechas medianas del primer despliegue foliar por grupos funcionales de vegetación, evaluando su relación mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo medio. En frondosas caducifolias, el SOS del producto CLMS LSP mostró la mayor coherencia con las observaciones *in situ* (R = 0,56; RMSE = 15 días; MAE = 13 días; sesgo = 10 días). En coníferas caducifolias, todos los productos alcanzaron correlaciones similares (R ≈ 0,61), aunque el SOS del VNP22Q2 registró las menores discrepancias con las observaciones del primer despliegue foliar (RMSE = 16 días; MAE = 13 días; sesgo medio = -10 días). En coníferas perennifolias, el SOS derivado de MCD12Q2 y VNP22Q2 alcanzó correlaciones elevadas con las observaciones *in situ* (R = 0,70-0,82), pero los errores y el sesgo fueron muy altos (RMSE, MAE y sesgo ≥ 36 días). En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que no existe un producto universalmente superior y subrayan la necesidad de validar los datos fenológicos derivados de satélite mediante observaciones independientes para una interpretación ecológica más robusta de las fenométricas.

**Palabras clave:** Fenología de la vegetación; Validación; Fenométricas; Europa.

## ***Comparative analysis of global land surface phenology products derived from MODIS, VIIRS, and OLCI against in situ leaf unfolding observations from the PEP725 network***

**Abstract:** The aim of this study was to assess the consistency between start of season (SOS) dates derived from the global phenological products MCD12Q2, VNP22Q2 and CLMS LSP, and in-situ human observations of the first leaf unfolding recorded by the PEP725 phenological network for the year 2023. SOS dates were spatially aggregated using buffer zones around each phenological station and paired with median leaf unfolding dates by vegetation functional group. Their relationships were evaluated using Pearson's correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and mean bias. For deciduous broadleaf species, SOS derived from CLMS LSP product showed the strongest agreement with in-situ observations (R = 0.56; RMSE = 15 days; MAE = 13 days; bias = 10 days). In deciduous conifers, all products achieved comparable correlations (R ≈ 0.61), although SOS derived from VNP22Q2 exhibited the lowest discrepancies relative to first leaf unfolding (RMSE = 16 days; MAE = 13 days; mean bias = -10 days). For evergreen conifers, SOS estimated from MCD12Q2 and VNP22Q2 showed high correlations with in-situ observations (R = 0.70-0.82) yet were associated with very large errors and pronounced bias (RMSE, MAE and mean bias ≥ 36 days). Overall, these findings indicate that no single product is universally superior and highlight the need to validate satellite-derived phenological data using independent observations to achieve a more robust ecological interpretation of phenometrics.

**Keywords:** Vegetation phenology; Validation; Phenometrics; Europe.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fenología de la superficie terrestre (*Land Surface Phenology*; LSP) se define como el estudio de la dinámica de los ciclos estacionales de la vegetación observados desde sensores satelitales (Helman, 2018). Este enfoque fenológico se basa en el análisis de series temporales de índices de vegetación, a partir de las cuales se pueden extraer un conjunto de métricas fenológicas, o fenométricas, asociadas con momentos clave del ciclo estacional, como el inicio (*Start of Season*; SOS) o el final de la estación de crecimiento (*End of Season*; EOS) (Zeng *et al.*, 2020).

La importancia de la LSP radica en su capacidad para monitorizar, de forma temporalmente continua y global, la dinámica estacional de la vegetación. Esto la convierte en una herramienta fundamental para el estudio de las interacciones clima-vegetación y la detección de respuestas a la variabilidad climática y al cambio global, así como para aplicaciones en modelización ecológica, agrícola y climática (Caparros-Santiago *et al.*, 2021). Sin embargo, la estimación de fenométricas no está exenta de incertidumbre. Esta incertidumbre está relacionada tanto con las características intrínsecas de los sensores satelitales (e.g., resolución espacial, resolución temporal) como por el índice de vegetación y la metodología empleada para la estimación de LSP (White *et al.*, 2009).

En este contexto, la validación de LSP mediante observaciones fenológicas independientes (e.g., observaciones humanas *in situ* a nivel de organismo) resulta esencial para cuantificar las incertidumbres asociadas, identificar posibles sesgos sistemáticos y mejorar la interpretación ecológica de las fenométricas (White *et al.*, 2009). Así, en este estudio se pretende evaluar la coherencia entre las fechas del SOS estimadas a partir de los productos globales de LSP derivados de los sensores MODIS (MCD12Q2), VIIRS (VNP22Q2) y OLCI (CLMS LSP), y las fechas de primer despliegue foliar registradas por la red fenológica PEP725, obtenidas mediante observaciones humanas directas a nivel de organismo para el año 2023 (único año común disponible para los tres productos).

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

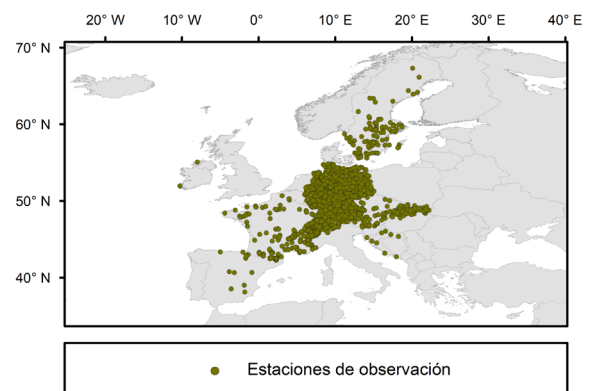
### 2.1. Datos

En este estudio se emplearon tres tipos principales de datos: (i) los productos globales MCD12Q2 (versión 6.1), VNP22Q2 (versión 2.0) y *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS) LSP; (ii) los datos sobre el primer despliegue foliar registrados por la red fenológica PEP725, obtenidos a partir de observaciones humanas directas a nivel de organismo; y (iii) la información cartográfica de las cubiertas del suelo procedente del producto anual MCD12Q1.

El SOS fue obtenido a partir de tres productos globales de LSP: MCD12Q2, VNP22Q2 y CLMS LSP. El producto [MCD12Q2](#) (versión 6.1) proporciona fenométricas globales desde el año 2001 basadas en datos MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*). Estas métricas se generan a partir de series temporales

de EVI2 (*two-band Enhanced Vegetation Index*) derivadas de compuestos temporales de 8 días a una resolución espacial de 500 m. Las series temporales son suavizadas mediante *splines* y el SOS se estima empleando una técnica basada en umbrales. Por su parte, el producto [VNP22Q2](#) (versión 2) proporciona fenométricas globales desde 2013 a partir de observaciones del sensor VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*). Estas métricas se derivan de series temporales de EVI2 basadas en compuestos temporales de 3 días a una resolución espacial de 500 m. Las trayectorias fenológicas se ajustan mediante funciones logísticas, a partir de las cuales el SOS se identifica mediante técnicas basadas en derivadas. Finalmente, el producto [CLMS LSP](#), derivado del sensor OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*) a bordo del satélite Sentinel-3, proporciona fenométricas desde el año 2023. Estas métricas se generan a partir de series temporales de PPI (*Plant Phenology Index*), basadas en compuestos de imágenes de 5 días a una resolución espacial de 300 m. Las trayectorias estacionales son suavizadas mediante *splines*, y el SOS se determina empleando una técnica basada en umbrales.

Los datos correspondientes a las fechas del primer despliegue foliar de distintas especies vegetales se obtuvieron a partir de observaciones fenológicas *in situ* registradas en la red paneuropea PEP725, y se utilizaron para la comparación con el SOS derivado de los productos fenológicos satelitales de MODIS, VIIRS y OLCI. Para el año 2023, el estudio fenológico correspondiente al primer despliegue foliar fue registrado en 1.921 estaciones de observación distribuidas a lo largo del continente europeo (Fig. 1).



**Figura 1.** Distribución espacial de las estaciones de observación de la red PEP725 en las que se registraron las fechas del primer despliegue foliar a nivel de organismo durante el año 2023.

La información relativa a las cubiertas del suelo se extrajo del producto anual de clasificación de coberturas de MODIS (MCD12Q1), disponible a una resolución espacial de 500 m. Específicamente, se utilizó el esquema de clasificación del *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP), con el objetivo de identificar las clases de vegetación natural correspondientes al año 2023 en el entorno de cada estación de observación. Dichas clases se emplearon para establecer la correspondencia con los grupos

funcionales de vegetación de los organismos registrados mediante observaciones fenológicas en campo.

## 2.2. Comparación entre el SOS y el primer despliegue foliar

Los datos fenológicos procedentes de la red PEP725 no suelen incluir la localización espacial precisa de los individuos vegetales dentro de cada estación de observación. Esta limitación introduce una fuente relevante de incertidumbre al relacionar las fenométricas (píxel) con las observaciones fenológicas *in situ* (punto), ya que la señal espectral registrada por el sensor puede no corresponder exactamente a los individuos cuyo estado fenológico se registra en campo. En consecuencia, la comparación directa entre las observaciones fenológicas a nivel de organismo y las fenométricas extraídas del píxel coincidente con la localización de la estación no resulta aconsejable (Tian *et al.*, 2021).

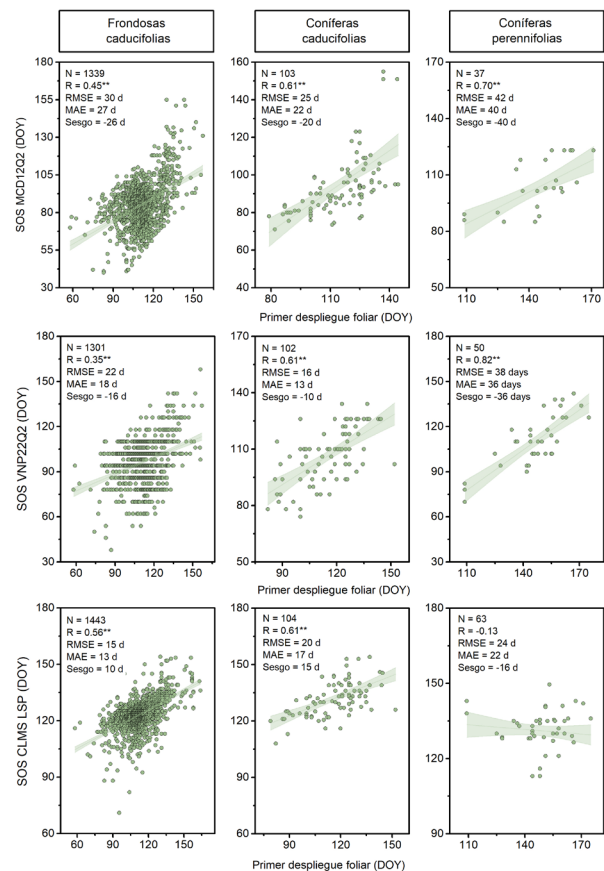
Para abordar esta limitación, se definió una zona de influencia (buffer) de 4 km de radio alrededor de cada estación fenológica, con el fin de vincular de forma más robusta las fechas del SOS con las fechas del primer despliegue foliar observadas en campo. Dentro de cada zona de influencia (buffer), las fechas del SOS fueron agregadas calculando el valor mediano de todos los píxeles seleccionados para cada producto. Únicamente se consideraron píxeles clasificados como de máxima calidad según los criterios de calidad específicas de cada producto. Adicionalmente, la selección de píxeles se restringió a los tipos de cobertura del suelo más relacionados con el grupo de vegetación del organismo observado en campo. Se definieron cuatro grupos de vegetación: (i) frondosas caducifolias, incluyendo bosques de frondosas caducifolias, bosques mixtos y sabanas leñosas; (ii) coníferas caducifolias, incluyendo bosques de coníferas caducifolias, bosques mixtos y sabanas leñosas; y (iii) coníferas perennifolias, incluyendo bosques de coníferas perennifolias, bosques mixtos y sabanas leñosas. Dado que el producto fenológico de OLCI es el único conjunto de datos empleado en este estudio cuya resolución espacial difiere de la del producto MCD12Q1, fue necesario garantizar la coherencia espacial durante el filtrado basado en los tipos de cobertura del suelo. Para ello, la información derivada del producto MCD12Q1 (500 m) se remuestreó a la resolución espacial del producto fenológico de OLCI (300 m).

En cuanto a los datos *in situ*, las fechas del primer despliegue foliar se agregaron calculando la mediana de las observaciones correspondientes a cada grupo funcional de vegetación dentro de cada estación. Posteriormente, estas fechas se emparejaron con las fechas medianas del SOS estimadas para el mismo grupo funcional dentro del buffer asociado a cada estación. A partir de estas parejas de datos, la relación entre las observaciones fenológicas *in situ* y las estimaciones satelitales se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), mientras que la magnitud de las discrepancias se cuantificó mediante el error cuadrático medio (*Root Mean Square Error*; RMSE) y el error absoluto medio (*Mean Absolute Error*;

MAE), y la tendencia sistemática de las diferencias se evaluó a través del sesgo medio.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fechas del SOS derivadas de los productos fenológicos globales de MODIS (MCD12Q2), VIIRS (VNP22Q2) y OLCI (CLMS LSP) fueron evaluadas frente a las observaciones *in situ* del primer despliegue foliar registradas por la red PEP725 en Europa, considerando los principales tipos de vegetación (Fig. 2). En términos generales, el grado de concordancia entre las estimaciones satelitales del SOS y las fechas del primer despliegue foliar mostró una elevada dependencia tanto del tipo de vegetación como del producto fenológico utilizado.



**Figura 2.** Diagramas de dispersión que muestran la relación entre el SOS derivado a partir de los productos fenológicos MCD12Q2 (MODIS), VNP22Q2 (VIIRS) y CLMS LSP (OLCI) y las fechas observadas del primer despliegue foliar (PEP725) para distintos tipos de vegetación. \*\* indica correlaciones altamente significativas ( $p < 0,01$ )

En las frondosas caducifolias, la correspondencia entre el SOS y las fechas del primer despliegue foliar fue de carácter moderado, con coeficientes de correlación que oscilaron entre  $R = 0,35$  y  $0,56$ . Específicamente, el SOS derivado de CLMS LSP mostró la mejor coherencia con los datos de campo, al registrar la correlación más elevada ( $R = 0,56$ ), junto con los valores más bajos de RMSE (15 días) y MAE (13 días), y un sesgo medio relativamente reducido (10 días). Por el contrario, los

productos MCD12Q2 y VNP22Q2 mostraron errores más altos (RMSE = 22-30 días; MAE = 18-27 días) y sesgos medios negativos pronunciados (-16 a -26 días), lo que indica una estimación más temprana del SOS con respecto a las fechas observadas del primer despliegue foliar. En las coníferas caducifolias, la concordancia entre el SOS y las fechas del primer despliegue foliar aumentó de forma consistente para todos los productos, con coeficientes de correlación con un valor de  $R = 0,61$ . En este caso, el SOS de VNP22Q2 se ajustó mejor a las observaciones de campo, con el menor RMSE (16 días), el menor MAE (13 días) y un sesgo medio relativamente reducido (-10 días). En las coníferas perennifolias, el SOS de los productos MCD12Q2 y VNP22Q2 mostró correlaciones elevadas con las fechas del primer despliegue foliar ( $R = 0,70-0,82$ ). No obstante, estas altas correlaciones se vieron acompañadas de errores muy elevados (RMSE y MAE > 36 días) y de sesgos negativos acusados ( $\geq 36$  días), lo que pone de manifiesto discrepancias sustanciales en términos absolutos entre las fechas estimadas por satélite y las observadas en campo. En contraste, aunque las diferencias entre el SOS derivado de CLMS LSP y las fechas del primer despliegue foliar fueron menores, la relación entre ambas variables fue muy débil ( $R = -0,13$ ) y no estadísticamente significativa ( $p > 0,05$ ).

Estos patrones divergentes entre productos y tipos funcionales de vegetación probablemente reflejan el efecto combinado de la resolución espacial y temporal, el índice de vegetación empleado y las metodologías de estimación fenológica, factores que condicionan la detección del SOS en distintos ecosistemas. En consecuencia, la validación de los productos globales de LSP mediante observaciones independientes resulta esencial para cuantificar incertidumbres, identificar sesgos sistemáticos y mejorar la interpretación ecológica de las fenométricas derivadas por satélite.

#### 4. CONCLUSIONES

La coherencia entre el SOS derivado de los productos fenológicos globales y las observaciones *in situ* del primer despliegue foliar varió según el producto y el tipo de vegetación. En frondosas caducifolias, el producto derivado de OLCI proporcionó los resultados más robustos, ya que el SOS presentó la correlación más alta con el primer despliegue foliar, junto con menores magnitudes de error y un sesgo más contenido. En el caso de las coníferas caducifolias, aunque el SOS derivado de los tres productos mostró niveles de asociación similares con las observaciones de campo, el producto derivado de VIIRS registró las menores discrepancias, con valores de RMSE y MAE más bajos y un sesgo medio menos pronunciado, lo que indica una mejor correspondencia entre las fechas estimadas por satélite y el primer despliegue foliar observado *in situ*. Por el contrario, en coníferas perennifolias, aunque el SOS derivado de los productos de MODIS y VIIRS alcanzó correlaciones elevadas, los errores y los sesgos elevados indican diferencias sustanciales entre las fechas estimadas por satélite y las observadas en campo.

En conjunto, los resultados indican que no existe un producto universalmente superior. Su idoneidad depende del tipo funcional de vegetación y de las características del producto. Futuras investigaciones deberían ampliar el análisis a series temporales más largas y a otras regiones bioclimáticas, con el fin de evaluar la coherencia espacial y temporal de las estimaciones del SOS y mejorar la aplicabilidad de los productos globales de LSP.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero prestado por el proyecto PID2023-152656OB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. También quieren expresar su agradecimiento a los colaboradores y proveedores de datos de la iniciativa PEP725, cuyo trabajo y dedicación han hecho posible el acceso a las observaciones fenológicas utilizadas en este estudio.

#### 6. REFERENCIAS

- Caparros-Santiago, J. A., Rodríguez-Galiano, V., & Dash, J. (2021). Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171, 330-347. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.019>
- Helman, D. (2018). Land surface phenology: What do we really 'see' from space?. *Science of the Total Environment*, 618, 665-673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.237>
- Tian, F., Cai, Z., Jin, H., Hufkens, K., Scheifinger, H., Tagesson, T., Smets, B., Van Hoolst, R., Bonte, K., Ivits, E., Tong, X., Ardö, J., & Eklundh, L. (2021). Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112456. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112456>
- White, M. A., de Beurs, K. M., Didan, K., Inouye, D. W., Richardson, A. D., Jensen, O. P., O'Keefe, J., Zhang, G., Nemani, R. R., van Leeuwen, W. J. D., Brown, J. F., de Wit, A., Schaepman, M., Lin, X., Dettlinger, M., Bailey, A. S., Kimball, J., Schwartz, M. D., Baldocchi, D. D., Lee, J. T., & Lauenroth, W. K. (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, 15(10), 2335-2359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>
- Zeng, L., Wardlow, B. D., Xiang, D., Hu, S., & Li, D. (2020). A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111511. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111511>