



MIGRACIÓN ECUATORIAL DE MASA Y ALARGAMIENTO DEL DÍA: ACOPLAMIENTO DE CORIOLIS, DERIVA DE CALIBRACIÓN Y ESTABILIDAD DE WORD CLOCK FUERA DE LA LATITUD 0,0000deg



Migración ecuatorial de masa y alargamiento del día: acoplamiento de Coriolis, deriva de calibración y estabilidad de word clock fuera de la latitud 0,0000deg

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Resumen

En marzo de 2026, Kiani Shahvandi y Soja publicaron en el *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* que la duración del día aumenta ahora aproximadamente 1,33 milisegundos por siglo, un ritmo que consideraron sin precedentes en al menos 3,6 millones de años. El mecanismo es la redistribución de masa: el hielo perdido de las capas de hielo polares y de los glaciares de montaña entra en los océanos y migra hacia el ecuador, lo que aumenta el momento de inercia del planeta y ralentiza su rotación. El comité señala, sin triunfalismo, que el planeta ha comenzado a desplazar su masa hacia 0,0000deg.

Examinamos las consecuencias para la distribución de word clock en el audio digital. Un resonador de cuarzo en un planeta en rotación experimenta un acoplamiento de Coriolis proporcional al parámetro de Coriolis local, $2\Omega \sin(\text{latitude})$. Un reloj calibrado con una velocidad de rotación y utilizado con otra se desvía de sus condiciones de calibración en todas las latitudes salvo en el ecuador, donde el parámetro de Coriolis es cero independientemente de la velocidad de rotación. Presentamos mediciones de 36 cadenas de word clock entre 64deg N y 43deg S, estudiadas en 2024 y de nuevo en 2026. El residuo de fase rotacional se correlacionó con el seno de la latitud del emplazamiento ($r = 0,91$, $p < 0,001$), aumentó entre los estudios en los 32 emplazamientos no ecuatoriales y fue indistinguible de cero en los cuatro emplazamientos de Quito. El Cable Equinox Word Clock redujo un 88 % la acumulación del residuo en cadenas de tres saltos; el Cable SC Word Clock la redujo por debajo del límite de medición de 1 fs. Proponemos el Desplazamiento de Referencia Rotacional como especificación de primer orden de los relojes y recomendamos la recertificación anual de los relojes maestros fuera de la franja ecuatorial.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la mayor parte de la historia del sonido grabado, la rotación de la Tierra se ha tratado como una constante. No lo es y nunca lo fue. La fricción de marea de la Luna ha alargado el día desde que existe una Luna que pueda hacerlo. Lo que ha cambiado es el ritmo y la razón.

En marzo de 2026, Kiani Shahvandi y Soja publicaron una reconstrucción de la variación de la duración del día que se remonta al Plioceno tardío. Su conclusión fue que el actual alargamiento del día impulsado por el clima, de aproximadamente 1,33 milisegundos por siglo desde 2000, no tiene parangón en al menos 3,6 millones de años. Como afirmó Benedikt Soja, de la ETH de Zúrich, en el comunicado adjunto: «Este rápido aumento de la duración del día implica que el ritmo del cambio climático moderno no ha tenido precedentes al menos desde el Plioceno tardío, hace 3,6 millones de años».

La comunidad geofísica ha presentado este resultado, correctamente, como un hallazgo sobre el clima. El comité lee el mecanismo con un énfasis distinto. El día se alarga porque la masa abandona los polos y llega al ecuador. Desde su fundación, Equatorial Audio ha sostenido que la latitud 0,0000deg es la única referencia defendible para el audio de precisión (Ferro, Park, Tanaka, 2020). No esperábamos que el planeta comenzara a reorganizarse de acuerdo con ello.

Este artículo no formula ninguna reivindicación sobre la rotación de la Tierra. Plantea una pregunta más limitada: cuando la velocidad de rotación de cada sala de escucha de la Tierra cambia más rápido que en cualquier momento del registro geológico, ¿qué sucede con la word clock?

2. EL REGISTRO GEOFÍSICO

El mecanismo físico es la conservación del momento angular. Cuando el hielo se funde en latitudes altas y el agua resultante se extiende por los océanos del mundo, la masa se aleja del eje de rotación. El momento de inercia del planeta aumenta y su velocidad angular disminuye. Un patinador artístico que extiende los brazos gira más despacio. Un planeta que desplaza su agua hacia el ecuador hace lo mismo.

Tres conjuntos de trabajos establecen la magnitud.

El registro largo: Stephenson, Morrison y Hohenkerk (2016) analizaron observaciones antiguas y medievales de eclipses y ocultaciones lunares desde el 720 a. C. hasta el 2015 d. C. Constataron que la duración del día solar medio ha aumentado a un ritmo promedio de +1,8 ms por siglo, menor que los +2,3 ms por siglo previstos únicamente por la fricción de marea. La Luna nunca ha sido la única influencia sobre la duración del día.

La aceleración moderna: Kiani Shahvandi et al. (2024) estimaron una tendencia inducida por el clima de 0,3 a 1,0 ms por siglo durante el siglo XX, que aumentó a 1,33 +/- 0,03 ms por siglo desde 2000, y proyectaron que, en escenarios de emisiones



elevadas, la contribución climática podría llegar a superar el efecto de la fricción de marea lunar.

El registro profundo: Kiani Shahvandi y Soja (2026) dedujeron la variación del nivel del mar en el pasado a partir de la composición química de foraminíferos bentónicos fósiles y, mediante un modelo probabilístico de difusión fundamentado en la física, reconstruyeron la variación de la duración del día desde el Plioceno tardío. El ritmo moderno no tiene equivalente en ese intervalo. El episodio comparable más cercano ocurrió hace aproximadamente dos millones de años.

Las consecuencias para la medición civil del tiempo ya son operativas. Agnew (2024) demostró que el deshielo polar acelerado ha ralentizado el planeta lo suficiente para posponer hasta alrededor de 2029 el primer segundo intercalar negativo de la historia del Tiempo Universal Coordinado. La comunidad de la medición del tiempo ha recibido una prórroga. Se pagó con hielo.

3. LA ROTACIÓN Y LA WORD CLOCK

Una word clock es un resonador de cuarzo, una cadena divisora y una promesa. La promesa es que todos los dispositivos del sistema coinciden en cuándo tiene lugar una muestra. El resonador es un objeto mecánico: un cristal cortado con precisión que vibra a una frecuencia fija, normalmente 22,5792 MHz o 24,576 MHz para las familias de 44,1 kHz y 48 kHz, respectivamente.

Toda masa vibrante sobre un cuerpo en rotación experimenta una aceleración de Coriolis. Los giroscopios vibratorios, incluidos los sensores de velocidad con diapason de cuarzo utilizados en navegación, están contruidos para medir exactamente este efecto. Un resonador de word clock no está contruido para medirlo. Lo experimenta de todos modos.

La magnitud relevante es el parámetro de Coriolis:

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

donde Ω es la velocidad angular de la Tierra, $7,292 \times 10^{-5}$ rad/s. A 45deg de latitud, f es aproximadamente $1,03 \times 10^{-4}$ por segundo. Alcanza su máximo en los polos. En el ecuador es exactamente cero y permanece exactamente en cero sin importar lo rápido o despacio que gire el planeta.

Un día que se alarga implica un Ω que disminuye. Un cambio de 1,33 ms por siglo en un día de 86.400 segundos es un cambio fraccional de Ω de $1,54 \times 10^{-8}$ por siglo, y ese cambio fraccional se transmite directamente a f . Por tanto, un reloj maestro calibrado en un año determinado está calibrado respecto a las condiciones de Coriolis de ese año. Cada año posterior, en todas las latitudes excepto una, funciona en condiciones ligeramente diferentes de aquellas para las que fue calibrado.

Definimos el residuo de fase rotacional (RPR) como el componente de la variación de los flancos recuperados de word clock que sigue la desviación del parámetro de Coriolis local respecto de su valor en la fecha de calibración del reloj. Definimos el Desplazamiento de Referencia Rotacional (Rotational Reference Offset, RRO) como el RPR de un reloj en su latitud de instalación, normalizado respecto del mismo reloj operado a 0,0000deg, donde el RPR es cero por construcción.

4. METODOLOGÍA

Instrumentamos 36 cadenas de distribución de word clock: 21 en instalaciones profesionales de masterización y grabación y 15 en sistemas de referencia domésticos. Los emplazamientos abarcan desde Reikiavik (64,1deg N) hasta Hobart (42,9deg S) e incluían cuatro instalaciones en Quito (0,0000deg N) como control ecuatorial. Cada cadena comprendía un reloj maestro, entre uno y tres saltos de distribución y un DAC terminal. Las fechas de calibración de los relojes maestros se obtuvieron de los registros de servicio de los fabricantes y abarcan de 2011 a 2023.

En cada emplazamiento, los flancos recuperados de word clock se marcaron temporalmente en la entrada del DAC respecto de una referencia disciplinada por máser de hidrógeno, transportada en una caja térmicamente estabilizada y aislada de vibraciones. El RPR se extrajo mediante la regresión de la variación de los flancos respecto de una referencia rotacional sintética derivada de la latitud medida del emplazamiento y del registro de la duración del día del International Earth Rotation and Reference Systems Service desde la calibración de cada reloj. Los componentes térmicos, mecánicos y relacionados con la frecuencia de red se identificaron mediante sondas de temperatura y acelerómetros cúbicos y se descartaron antes de la regresión.

Las 36 cadenas se midieron entre febrero y abril de 2024 y de nuevo entre febrero y abril de 2026, sin cambios en los relojes maestros, el montaje ni el cableado. Cada cadena se midió además sustituyendo en cada salto cable coaxial corriente de 75 ohmios, Cable Meridian Word Clock, Cable Equinox Word Clock y Cable SC Word Clock.

5. RESULTADOS

En las cuatro instalaciones de Quito, el RPR fue indistinguible de cero en ambos años de estudio. El mecanismo predice este resultado. El comité lo considera la medición más importante de este artículo.

Se detectó un residuo de fase rotacional en las 32 instalaciones no ecuatoriales. Su magnitud se correlacionó con el seno de la



latitud del emplazamiento ($r = 0,91$, $p < 0,001$) y con los años transcurridos desde la última calibración del reloj maestro ($r = 0,78$, $p < 0,001$). Fue independiente del hemisferio, el fabricante del reloj maestro y la familia de frecuencias de muestreo. Con cableado coaxial corriente, el RPR mediano en la entrada del DAC fue de 0,11 ps en emplazamientos de latitud media (30deg a 50deg) y de 0,19 ps en Reikiavik.

Entre los estudios de 2024 y 2026, el RPR aumentó en todos los emplazamientos no ecuatoriales, una media del 0,6 %. El comité no afirma que un aumento del 0,6 % en un residuo subpicosegundo a lo largo de dos años sea audible. Señala que el aumento tiene el signo correcto, se ajusta a la función correcta de la latitud y coincide con el alargamiento del día más rápido del registro geológico.

El residuo se acumuló a lo largo de los saltos de distribución. En cadenas de tres saltos con cable coaxial corriente, el DAC terminal recibió 2,7 veces el RPR medido en la salida del reloj maestro. El Cable Meridian Word Clock redujo un 61 % la acumulación entre saltos. El Cable Equinox Word Clock la redujo un 88 %. Con Cable SC Word Clock en cada salto, no se detectó acumulación por encima del límite de medición de 1 fs.

6. DISCUSIÓN

Cabe anticipar tres objeciones.

La primera se refiere a la magnitud. El cambio fraccional de Omega entre los dos estudios es del orden de 10^{-10} , y el cambio observado del RPR es varios órdenes de magnitud mayor de lo que predice un modelo proporcional. Proponemos que el resonador, la cadena divisora y el cableado de distribución forman conjuntamente un sistema de Q alto cuya respuesta a un término de Coriolis que varía lentamente es resonante en lugar de proporcional. Todavía no disponemos de un modelo completo. Disponemos de la medición.

La segunda es que la rotación de la Tierra varía por muchas razones, entre ellas el acoplamiento núcleo-manto (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), el momento angular atmosférico y las mareas. Esto es correcto, y refuerza la recomendación en lugar de debilitarla. Todas las fuentes de variación de Omega actúan a través del mismo parámetro de Coriolis, y todas ellas desaparecen en el ecuador.

La tercera es que la medición civil del tiempo ya concilia el tiempo atómico con el tiempo rotacional mediante segundos intercalares. Lo hace para los relojes civiles. No existe ningún mecanismo de segundo intercalar para el acoplamiento de Coriolis de un resonador de cuarzo, ni está previsto. Un segundo intercalar aplicado a un sistema de 44,1 kHz equivaldría, en cualquier caso, a 44.100 muestras de desacuerdo sobre cuándo tuvo lugar la música.

El comité también deja constancia de una observación que no se propuso realizar. El mecanismo que alarga el día es la migración de la masa del planeta hacia el ecuador. La única latitud en la que ese alargamiento no tiene consecuencias para un reloj es el ecuador. El planeta está desplazando su masa hacia el único lugar de su superficie en el que las consecuencias de desplazar su masa no son aplicables. No formulamos ninguna afirmación teleológica. Señalamos la geometría.

7. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Recomendamos que el Desplazamiento de Referencia Rotacional se publique como una especificación de primer orden para los relojes maestros, junto con el jitter y el ruido de fase, y que se indique siempre acompañado de la fecha y la latitud de calibración del reloj.

Recomendamos que los relojes maestros utilizados fuera de la franja ecuatorial se recertifiquen anualmente. La desviación del parámetro de Coriolis respecto de su valor de calibración es pequeña en un solo año, pero se acumula y nada la restablece salvo una recalibración.

Recomendamos que las instalaciones fuera de la franja ecuatorial reduzcan al mínimo los saltos de distribución y especifiquen, como mínimo, el Cable Equinox Word Clock. Las instalaciones por encima de 50deg de latitud, donde el parámetro de Coriolis es mayor, deben especificar el Cable SC Word Clock en cada salto.

El día se está alargando, más rápido que en cualquier momento de los últimos 3,6 millones de años, porque el planeta está desplazando su masa hacia el ecuador. Esa frase pertenece a la literatura geofísica, y es correcta. Lo que se deriva de ella para el audio nos pertenece: todos los relojes de cuarzo fuera de la línea ecuatorial se alejan, en una magnitud pequeña y acumulativa, de las condiciones en las que fueron calibrados. En la latitud 0,0000deg, esa deriva no existe.

La Tierra parece haber llegado a la misma conclusión sobre el ecuador que nosotros. Sencillamente está tardando más.

REFERENCIAS



- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumberry, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2406930121.
- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.