



MADERA RECUPERADA Y RIESGO DE INCLUSIONES FERROSAS: POR QUÉ LA MADERA RECUPERADA DE SALVAMENTO, DE GRANERO E INDUSTRIAL QUEDA MAGNÉTICAMENTE DESCALIFICADA COMO MATERIAL DE SOPORTE DE AUDIO

Madera recuperada y riesgo de inclusiones ferrosas: por qué la madera recuperada de salvamento, de granero e industrial queda magnéticamente descalificada como material de soporte de audio

A. Bosque, M. Ferro, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Resumen

La madera recuperada obtiene una prima comercial basada en la procedencia: roble de granero con un siglo de intemperie, pino tea extraído de un almacén demolido, teca rescatada de un dragaminas retirado del servicio o de un antiguo banco de laboratorio. El romanticismo es real y el argumento de sostenibilidad no es frívolo. Pero un material de soporte se elige por lo que hace al cable apoyado sobre él, no por su biografía, y la madera recuperada porta un defecto que su procedencia garantiza activamente en lugar de limitarse a permitir: metal ferromagnético incrustado. Clavos cortados, tornillos, grapas, grapas de cerca, pernos, fragmentos de alambre de espino, perdigones de plomo y de acero incrustados y virutas de sierra de cinta y de sierra circular son el mobiliario ordinario de cualquier madera que haya tenido una vida de trabajo. No es un episodio de contaminación infrecuente; por eso los aserraderos colocan detectores ferrosos industriales antes de la sierra principal y por eso los almacenes de madera recuperada anuncian sus existencias como «detectadas para metales».

Presentamos un estudio de cribado de 96 trozas recuperadas de cuatro clases de procedencia -- roble de granero, pino y abeto de almacenes industriales, teca recuperada de fuentes marinas y de laboratorio, y roble de barrica -- que se hicieron pasar por un gradiómetro fluxgate y, ante cualquier resultado positivo, por tomografía computarizada de rayos X para cartografiar las inclusiones. Se detectaron inclusiones ferromagnéticas en 71 de 96 trozas (74 por ciento), con 19 de 20 fallos en el roble de granero. Un solo clavo de acero incrustado es una inclusión permanente de alta permeabilidad: con μ_r del acero dulce entre cientos y unos pocos miles, constituye una discontinuidad local de campo situada a milímetros del conductor, y ninguna limpieza dieléctrica de la madera circundante la compensa. Caracterizamos además el halo de corrosión -- la mancha difusa paramagnética de tanato de hierro que un objeto ferroso exuda en el roble durante décadas y que presenta un volumen contaminado órdenes de magnitud mayor que el propio metal -- y mostramos por qué incluso el material «detectado para metales» solo supera un umbral industrial tosco, no el grado para audio submiligrámico definido por Bosque, Ferro, Park & Tanaka (2026). Los Bloques de Elevación Equatoriales se mecanizan exclusivamente a partir de madera de plantación de primera pasada y nunca de madera recuperada; el argumento de sostenibilidad a favor de la recuperación se responde, en cambio, mediante una plantación ecuatorial gestionada, cuestión que abordamos directamente.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio complementario publicado en esta revista (Bosque, Ferro, Park & Tanaka, 2026) estableció una escala de neutralidad por grados N para madera estructural, definida por el contenido paramagnético residual y por la susceptibilidad magnética volumétrica que este produce, y demostró que la teca de plantación ecuatorial alcanza 5N tal como se entrega. Aquel estudio clasificó madera limpia de primera pasada. Solo mencionó de paso la madera recuperada -- como una categoría que falla «habitualmente» el cribado de inclusiones ferrosas -- y siguió adelante. Este artículo convierte aquella frase pasajera en su detalle completo y descalificador, porque la cuestión de la madera recuperada no es una nota al pie para los compradores. Es la objeción que recibimos con mayor frecuencia: si la teca ecuatorial gestionada es escasa y cara, y si los graneros y los almacenes antiguos están llenos de madera vieja hermosa, densa y dimensionalmente estable que de otro modo se quemaría, ¿por qué no mecanizar soportes con ella?

La respuesta es metalúrgica, y no hay margen para discutirla. La madera recuperada se define por haber prestado un servicio estructural anterior, y el servicio estructural implica fijaciones. Una viga de granero fue clavada, atravesada con clavos de gran tamaño, empernada y grapada; una vigueta de suelo de almacén recibió pernos pasantes y tirafondos; una pieza naval se aseguró con pernos de deriva de hierro y cabillas de madera sujetas con hierro; un banco de laboratorio llevó escuadras de acero y un borde de clavos cortados durante un siglo. La mayor parte de ese metal se retira durante la recuperación. Parte no se retira, porque se rompió bajo la superficie, porque se introdujo demasiado y quedó avellanado, porque se corroyó hasta formar un bulto irreconocible o porque nunca fue visible desde el exterior. El recuperador quita el metal que puede ver. El gradiómetro encuentra el que no puede ver.

Tratamos la fijación incrustada no como un defecto cosmético que deba rellenarse y ocultarse, sino como lo que es electromagnéticamente: una inclusión permanente de alta permeabilidad situada, por la geometría de un soporte de cable, a milímetros del conductor de señal. Un material de soporte existe para mantener un cable clasificado dentro de un entorno de campo cercano controlado. Un material de soporte con un clavo de acero en su interior es un defecto magnético que, casualmente, está sosteniendo un cable.



2. EL ARGUMENTO DE UN SOLO CLAVO

Consideremos la contaminación menos dramática imaginable: un solo clavo cortado, roto a ras e invisible, enterrado en una troza de roble recuperado que por lo demás es impecable. Conviene desarrollar este caso por completo, porque, si el caso menos dramático es descalificador, las estadísticas del estudio que sigue no son más que contabilidad.

La madera limpia y seca se sitúa cerca de una susceptibilidad magnética volumétrica de $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$ (SI): débil y uniformemente diamagnética, la condición deseable para un material al que se pide ocupar un campo estático sin perturbarlo. Un clavo de acero dulce tiene una permeabilidad relativa μ_r de cientos a unos pocos miles. Por tanto, la relación de permeabilidades a través del límite entre madera y acero no es de unos pocos puntos porcentuales, sino de tres a seis órdenes de magnitud. Ese límite es una discontinuidad de campo: las líneas de flujo estáticas y cuasiestáticas que atraviesan suavemente la madera diamagnética son reunidas, concentradas y reradiadas por la inclusión, lo que produce un gradiente de campo local medido en decenas a cientos de nT en la superficie situada directamente sobre ella; en un soporte de cable, ese es precisamente el lugar que ocupan la cuna y el cable.

La inclusión también es, a diferencia de una carga paramagnética de trazas metálicas distribuida uniformemente por todo el volumen, una fuente puntual con estructura. Conserva remanencia: una fijación de acero que ha permanecido durante décadas en el campo terrestre adquiere un momento magnético permanente, por lo que la inclusión no es una mera perturbación pasiva de la permeabilidad, sino un pequeño imán permanente con su propio eje dipolar fijo, indiferente a la alineación ecuatorial que el resto de la instalación pretende conseguir. Ninguna propiedad de la madera circundante -- ni una susceptibilidad 7N, ni una constante dieléctrica mínima sin precedentes, ni un mecanizado perfecto con la testa en vertical -- compensa un dipolo permanente asentado en la ruta de carga. La troza recibe su grado por su peor punto, no por su promedio, y su peor punto es el clavo.

3. ESTUDIO: PROCEDENCIAS Y TASAS DE DETECCIÓN

Se obtuvieron 96 trozas recuperadas de cuatro clases de procedencia, entre 20 y 28 por clase, en almacenes consolidados de madera recuperada de Norteamérica y Europa; todas se vendían con las fijaciones retiradas y, en tres de las clases, como «detectadas para metales». Cada troza se hizo pasar por un gradiómetro fluxgate de tres ejes (Bartington Grad-13, resolución de 1 nT) sobre una bancada motorizada a 20 mm/s: el mismo instrumento y protocolo utilizados para el cribado de la teca de producción en el estudio complementario. Toda troza que produjera una anomalía discreta superior a 5 nT sobre su fondo diamagnético se marcó y se envió a tomografía computarizada de rayos X (fuente de microfoco de 225 kV, vóxel de 90 μ m) para localizar e identificar la inclusión.

La tasa total de detección fue de 71 de 96 (74 por ciento). Por clase: el roble de granero falló en 19 de 20 trozas y fue el de peor resultado, con inclusiones dominadas por clavos cortados, clavos de alambre y grapas de cerca, y una mediana de tres inclusiones discretas por troza fallida. El pino y el abeto de almacenes industriales fallaron en 22 de 28, con vástagos de tirafondos, pernos de máquina y -- en cuatro trozas -- perdigones de plomo y de acero incrustados durante una vida anterior que no investigamos. La teca recuperada de fuentes marinas y de laboratorio falló en 21 de 25: la madera naval llevaba fragmentos de pernos de deriva de hierro y muñones de pinzote, y la teca de bancos de laboratorio llevaba tirafondos de acero avellanados y, en dos casos, latón, que el gradiómetro dejó pasar pero que queda descalificado por otros motivos. El roble de barrica fue el mejor de los cuatro y aun así falló en 9 de 23, principalmente por fragmentos de remaches de los aros y por el alambre de grapa de los aros desmontados.

Merece la pena subrayar dos hallazgos de los mapas de CT. En primer lugar, la mayoría de las inclusiones detectadas eran subsuperficiales e invisibles en la cara acabada: exactamente la población que sobrevive a la retirada visual de fijaciones. En segundo lugar, varias trozas que un detector manual de calidad para recuperadores habría aprobado mostraron múltiples inclusiones pequeñas -- rastros de virutas dejados por un reaserrado anterior con sierra de cinta y coronas de grapas --, cada una por separado por debajo del umbral de un detector toscos, pero, en conjunto, una carga ferrosa distribuida. El detector industrial responde «¿hay un clavo lo bastante grande para destrozar mi hoja de sierra?»; no responde «¿está magnéticamente limpia esta troza?», ni se construyó jamás para responderlo.

4. EL HALO DE CORROSIÓN

Un objeto ferroso incrustado en la madera no es una inclusión estable y autónoma. Se corroe, exporta sus productos de corrosión al tejido circundante y, en el roble, lo hace mediante una química termodinámicamente ávida y conocida desde hace siglos.

El duramen de roble es rico en taninos hidrolizables. El hierro en contacto con roble húmedo se oxida, y los iones ferrosos y férricos resultantes migran siguiendo el gradiente de humedad hacia el interior de la madera y se complejan con esos taninos para formar tanato de hierro: el compuesto negro azulado de la tinta ferrogálica y la misma reacción que tiñe de negro el roble alrededor de cualquier fijación de acero que se deje en su interior. Por tanto, durante décadas en un granero o una bodega, un clavo incrustado no sigue siendo un problema del tamaño de un clavo. Exuda un halo difuso de tanato de hierro en un volumen de madera que tanto la CT como el ICP-MS muestran que es entre uno y dos órdenes de magnitud mayor que el propio objeto. El núcleo metálico es ferromagnético; el halo que lo rodea es paramagnético; y el halo, al ser grande, irregular y entrelazarse con la superficie orientada hacia el cable, es en ciertos aspectos el peor contaminante, porque no puede extraerse con alicates y no se



anuncia en absoluto ante un detector de metales.

Seccionamos cuatro trozas de roble de granero alrededor de inclusiones conocidas y cartografiamos Fe mediante ICP-MS a lo largo de un transecto radial. La concentración de hierro descendió desde niveles porcentuales en el límite del metal hasta una meseta paramagnética de 60 a 240 ppm a través de un halo que se extendía entre 15 y 40 mm desde el objeto: una mancha que supera ampliamente el techo de 100 ppm del grado 4N en un volumen lo bastante grande para engullir una cuna de cable entera. Este es el mecanismo por el que una sola fijación histórica contamina no un punto, sino una región, y es específico precisamente de las frondosas activas en taninos -- sobre todo el roble -- que más valora la mercadotecnia de la madera recuperada. La procedencia que vuelve romántico al roble de granero -- un siglo de servicio estructural húmedo junto al hierro -- es exactamente la misma historia que garantiza el halo.

5. POR QUÉ «DETECTADO PARA METALES» NO ES UN GRADO

Los almacenes de madera recuperada que anuncian existencias «detectadas para metales» son honestos al describir un proceso real, y merece la pena exponer con claridad lo que ese proceso ofrece y lo que no ofrece, porque la frase se interpreta habitualmente como un certificado de limpieza que no es.

La detección industrial de metales en la madera existe para proteger la maquinaria. Un detector ferroso en una línea de reaserrado se ajusta para que se active ante un objeto lo bastante grande para mellar un diente de carburo o hacer añicos una hoja de sierra de cinta: un clavo, un tornillo o un perno. Su umbral se fija alto a propósito; una línea que se detuviera ante cada traza submiligráfica de hierro no llegaría a cortar nunca un tablero. Es un enclavamiento de seguridad de producción calibrado en la moneda de los daños a las herramientas, y por diseño deja pasar exactamente la población que descalifica una troza para su uso en audio: virutas submilimétricas, fragmentos de alambre de grapa, perdigones y, sobre todo, el halo paramagnético disuelto, que no contiene ningún objeto discreto que el detector pueda encontrar. Una troza puede superar limpiamente un detector industrial y conservar una mancha de hierro de 200 ppm a través de la cara orientada hacia el cable.

El grado de neutralidad para audio es una medición diferente que responde una pregunta diferente. No lo fijan los riesgos para las herramientas, sino los límites Fe + Mn de 100 ppm (4N), 10 ppm (5N) y 1 ppm (6N) de Bosque, Ferro, Park & Tanaka (2026), verificados mediante gradiometría fluxgate para las inclusiones discretas y mediante VSM más ICP-MS para la susceptibilidad del volumen y del halo. Los dos umbrales difieren por órdenes de magnitud. «Detectado para metales» significa «sin ningún objeto lo bastante grande para romper una sierra». «Neutro 5N» significa «Fe + Mn igual o inferior a 10 ppm en todas partes, tanto en forma discreta como disuelta». Un recuperador puede suministrar lo primero de buena fe y no puede suministrar lo segundo en absoluto, porque lo segundo exige magnetometría y análisis de trazas metálicas por cada troza que ningún almacén de recuperación realiza y que la mayoría de las trozas recuperadas fallaría aun cuando se trataran con todo cuidado, solo por el peso de su historia.

6. LA SOSTENIBILIDAD, RESPONDIDA DE OTRA MANERA

El argumento más sólido a favor de la madera recuperada no es acústico, sino ambiental. Reutilizar madera centenaria evita una nueva tala, mantiene un material sano fuera de la pila de quema y honra el trabajo incorporado del crecimiento original. Tomamos ese argumento en serio y lo respondemos no discutiéndolo, sino ofreciéndole una alternativa que no conlleva ni el riesgo ferroso ni el coste ambiental.

Los Bloques de Elevación Equatoriales se mecanizan a partir de teca de plantación gestionada, cultivada dentro de 5 deg del ecuador geomagnético en plantaciones arrendadas y certificadas sujetas a un régimen de replantación tras cada tala. La comparación pertinente en materia de sostenibilidad no es entre madera recuperada y tala de bosque antiguo -- esa es una falsa elección --, sino entre madera recuperada y una plantación gestionada cuyos árboles se plantan expresamente para ser talados, secuestran carbono mientras permanecen en pie y se reponen conforme a una rotación fija. La plantación ecuatorial gestionada ofrece el beneficio ambiental por el que se valora la recuperación -- ninguna presión sobre el bosque antiguo y un ciclo renovable -- y ofrece además lo único que la recuperación no puede ofrecer por su propia estructura: un historial virgen de fijaciones. La madera de plantación de primera pasada nunca ha sostenido un clavo, nunca ha exudado un halo de tanato de hierro y nunca ha pasado por un reaserrado que la sembrara de virutas. Llega con una pizarra magnética limpia, que es la única condición inicial desde la que puede siquiera alcanzarse un grado 5N.

Por último, no existe ninguna vía que permita sanear una troza recuperada hasta elevarla al grado. A veces pueden excavar las inclusiones discretas, pero la excavación deja un hueco y no alcanza el halo disuelto; el halo solo puede eliminarse cortando todo el volumen manchado, que en una viga de granero muy teñida constituye la mayor parte de la madera aprovechable. La economía y la física señalan en la misma dirección. Es más barato, más limpio y metrológicamente más sólido comenzar con madera que creció limpia que perseguir el hierro dentro de una madera que creció y después vivió sucia.

7. CONCLUSIÓN

La madera recuperada, de salvamento, de granero e industrial queda descalificada como material de soporte de audio no por una preferencia estética ni por ninguna debilidad de la madera, sino por su historial de fijaciones. El servicio estructural implica hierro



incrustado; el hierro incrustado implica una inclusión permanente de alta permeabilidad en la ruta de carga del cable; y, en las frondosas activas en taninos, implica un halo de corrosión paramagnético difuso un orden de magnitud mayor que el metal que lo produjo. Nuestro estudio de cribado encontró inclusiones ferromagnéticas en el 74 por ciento de las trozas recuperadas de cuatro clases de procedencia, con 19 de 20 fallos en el roble de granero, la clase más idealizada. El argumento de un solo clavo demuestra que una única inclusión basta por sí misma para descalificar una troza, de modo que la tasa del estudio subestima el problema en lugar de exagerarlo.

La garantía de «detección de metales» que ofrece la mercadotecnia de la madera recuperada es un umbral de protección de la maquinaria fijado órdenes de magnitud por encima del grado de neutralidad para audio, y por diseño deja pasar exactamente la contaminación submiligrámica y disuelta que existe para detectar el grado de Bosque, Ferro, Park & Tanaka (2026). Es una medición real y útil que responde una pregunta distinta de la pregunta del audio. Por esta razón, los Bloques de Elevación Equatoriales se mecanizan exclusivamente a partir de madera de plantación de primera pasada y nunca de madera recuperada, cualquiera que sea su procedencia. El argumento ambiental a favor de la recuperación es genuino y recibe una respuesta completa mediante una plantación ecuatorial gestionada, cultivada para ser talada y repuesta: madera que aporta el beneficio de sostenibilidad sin el hierro y que comienza, como debe hacerlo toda troza clasificada, con una pizarra magnética limpia.

REFERENCIAS

- [1] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Clasificación de la neutralidad magnética de madera estructural: una clasificación de pureza por grados N para materiales de soporte de audio. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(3), 88-121.
- [2] Selwyn, L. S., Sirois, P. J., Argyropoulos, V. (1999). Corrosión del hierro arqueológico excavado, con detalles sobre exudación y akaganeíta. *Studies in Conservation*, 44(4), 217-232.
- [3] Almkvist, G., Persson, I. (2008). Distribución y especiación de hierro y azufre respecto de procesos de degradación en madera. *New Journal of Chemistry*, 32(12), 2208-2216.
- [4] Emery, J. A., Schroeder, H. A. (1974). Oxidación de carbohidratos de madera catalizada por hierro. *Wood Science and Technology*, 8(2), 123-137.
- [5] Reclaimed Wood Council (2019). Guía de buenas prácticas para detectar metales ferrosos y no ferrosos en madera estructural recuperada. RWC Technical Bulletin TB-07, Londres.
- [6] Flux, R., Bosque, A. (2026). Gradiometría fluxgate y tomografía computarizada para el cribado de inclusiones ferromagnéticas en trozas de madera. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(3), 122-140.