

Cartafueyos Asturianos
de Ciencia y Teunoloxía

Payares 2025 // Número 15

Ciencias

Liques urbanos y contaminación: un ensayu n'Uviéu

/// ARSÉNICU Y MERCURIU N'ESCOMBRERES MINERES DE LLENA ///

/// LOS NÚMEROS PRIMOS ///

/// NARCOLEPSIA INFANTIL Y XUVENIL ///



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



REDAICIÓN

Conseyu de redaición
 Presidenta: Ana María Cano González
 Direutor: Carlos Lastra López

Comité d'espublización
 Mario Díaz Fernández
 Santiago García-Granda
 Xabiel García Pañeda
 Eva García Vázquez
 Juan José Lastra Menéndez
 Carlos López Fernández
 Concha Masa Noceda
 David Melendi Palacio
 Xosé Antón Suárez Puente
 Pedro Suárez Rodríguez

Diseño gráficu y maquetación
 Nacho Arbesú

Semeya de portada
 Dellos morfotipos de lliques emplegaos como indicadores de contaminación nun trabayu de Ciencia Ciudadana n'Uviéu. [Semeya d'Antonio Torralba]

EDITA

Academia de la Llingua Asturiana
 C/ L'Águila, 10
 Apartáu de Correos 574
 33080 Uviéu
 Tfnu. 985 211 837
 www.alladixital.org
 edicion@alladixital.org
 f AcademiadelaLlinguaAsturiana
 x @ALLA_ast

Depósitu Llegal: AS-4862-2011
ISSN: 2174-9639

Imáxenes: fontes al pie de semeya
 Les opiniones y artículos equí recoyíos son responsabilidad de los sos autores y nun han ser necesariamente compartíos pola revista.

SUMARIU

4 / **Los números primos. Teoremes y conxetures**
 Por Francisco ARGÜESO-GÓMEZ

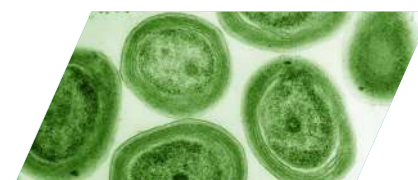
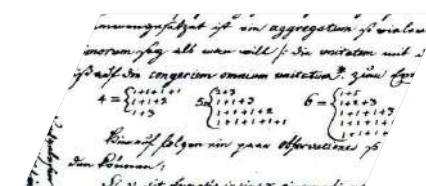
18 / **La narcolepsia na etapa infantil y xuvenil**
 Por Xesús GONZÁLEZ-RATO

34 / **¿Ú tán les coraes del planeta?**
 Por José Ramón OBESO

44 / **El llixiviáu d'Arsénicu nes escombreres de les mines de Mercuriu de L'Jena**
 Por Ángeles FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Begoña FERNÁNDEZ-PÉREZ, Antonio MARQUÉS-SIERRA y Noemí GUALLAR-MACHÍN

62 / **Naturalización urbana y dellos exemplos en Xixón**
 Por Xuan Carlos MARTÍNEZ

76 / **Los lliques urbanos como ferramienta pa la reflexón educativa al rodiu de la calidá del aire na nuesa ciudá. Un ensayu n'Uviéu**
 Por Antonio TORRALBA-BURRIAL, Eduardo CIRES y Sergio PÉREZ-ORTEGA

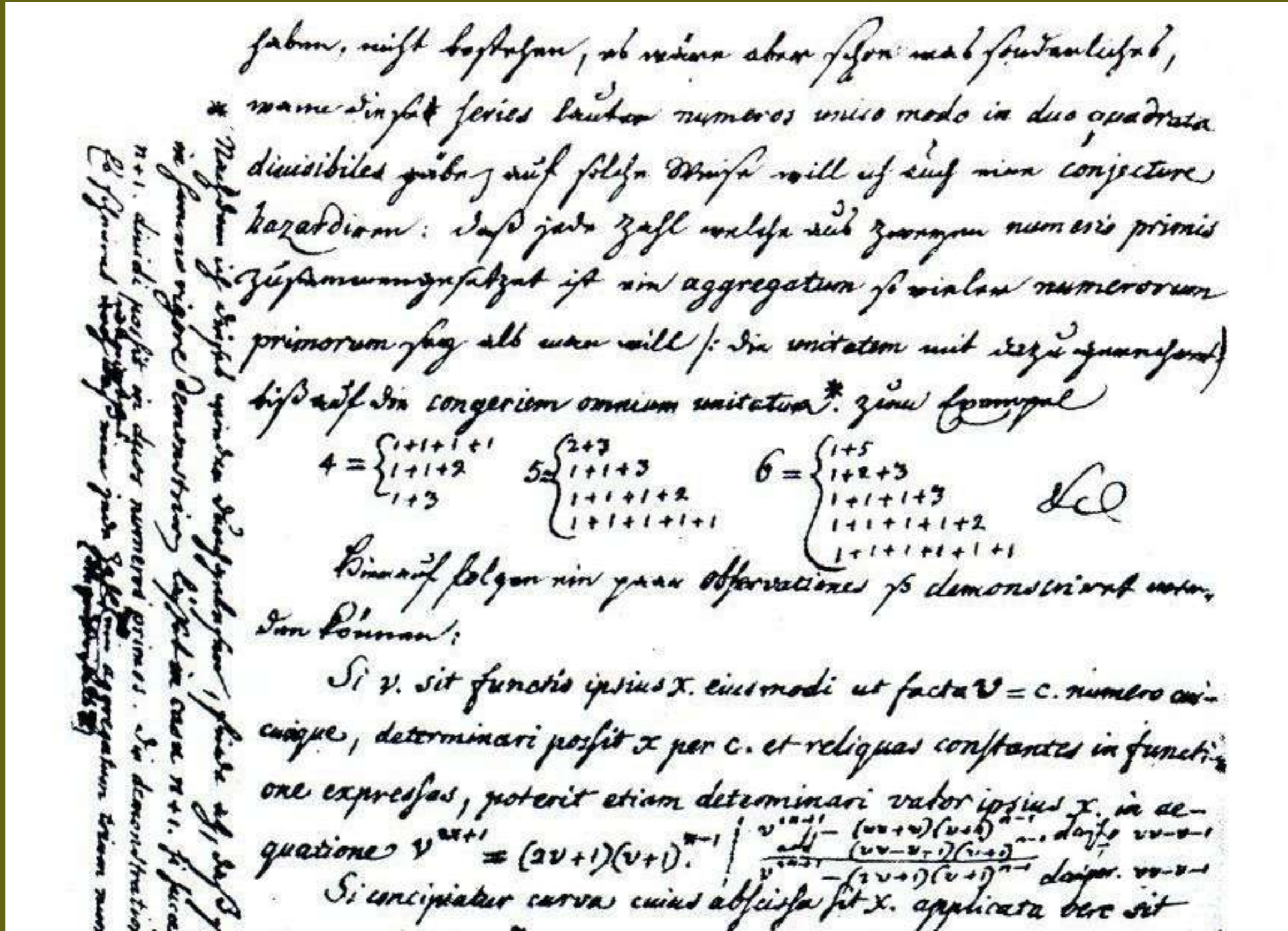


Los números primos. Teoremas y conjeturas

Hai delles selmanes tuvi ordenando una riestra de carpetes nes que guardo artículos estremaos de física y matemática. Yeren artículos que salieron d'internet y qu'imprimiera pa lleelos (o non) con calma. Ente ellos taben les notes d'una conferencia que dio en 2007 Terence Tao, Medalla Fields en 2006, Premiu Princesa d'Asturies de les Ciencias 2020 y ún de los matemáticos actuales más destacaos. El título de la ponencia ye «Estructura y aleatoriedá nos números primos». Anque les notes son bastante esquemátiques, paeciéronme un bon resume de lo que sabemos al rodiu de los números primos y tamién de les sos aplicaciones. El tema de los números primos siempre me llamó mucho l'atención y rápido quixi saber cómo d'actuales yeren los resultaos que Tao presentaba. Dempués d'una busca n'internet, l'ayuda del ChatGPT y la llectura d'unos pocos llibros, llegué a tener una idea de cuál yera l'estáu anguaño, en 2025, de los nuevos conocimientos al rodiu de los números primos y decíme a escribir (a lo primero pa ordenar les mios ideas) un resume d'ellos.

Cachu d'una carta de Goldbach a Euler del 1742.

Por **Francisco Argüeso Gómez**
Caderalgu xubiláu del Área de Matemática Aplicada
Departamentu de Matemátiques
Universidá d'Uviéu



Tenté d'escribir algo pa un público bastante xeneral pero interesáu nestes cuestiones y facer el mio resume lo más accesible posible, centráu na definición básica del número primu y dos teoremas fundamentales (ún d'ellos prueba qu'hai primos infinitos). Na segunda sección, falo de cómo buscar números primos, comentando la criba clásica d'Eratóstenes. Na tercera, presento los primos de Mersenne, los números perfectos y los primos ximielgos. Esto pue vese como la exposición d'una serie de cosas d'ellas agradables al rodiu de los números primos, pero los primos de Mersenne permítenos algamar números primos mui grandes, mui útiles en criptografía. La cuarta sección encara'l problema, entá nun resueltu, na distribución de los primos.

¿Existe dalguna fórmula que nos diga cuántos números primos hai menores qu'un determináu x ? La sección quinta trata la conxetura de Goldbach, un problema mui cenciellu de plantegar, pero mui difícil d'iguar. Pa terminar, la última sección trata la utilidá de los números primos, que, sorprendentemente resulten esenciales pa la seguididá de les nuses comunicaciones y tresferencies per internet.

Camiento que l'estudiu de los números primos ye enforma llamaderu y tien la ventaya de que los teoremas y conjeturas relacionaes con ellos tienen munches veces un enunciáu mui simple, aunque les demostraciones seyan d'una dificultá máxima.

DEFINICIONES BÁSIQUES.

¿PRIMOS INFINITOS?

¿Qué ye un número primu? La definición ye mui simple:

Un número primu ye un número natural mayor que 1 que namás se pue dividir ente él

El número 12 ye perafayadizu porque pue dividise por 1, 2, 3, 4, 6, 12, lo que fai que tovía usemos la docena de güevos, que podemos repartir ente dos, tres, cuatro o seis persones, dando a caún el mesmu número

mesmu y la unidá.

Ejemplos: 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23,, 91

El ser humanu tentó de repartir conxuntos d'oxetos en grupos iguales dende tiempos inmemoriales. Hai grupos que se dexen repartir mui bien, al ser el número d'oxetos ún con munchos divisores. Asina, 12, ye un número perafayadizu porque pue dividise por 1, 2, 3, 4, 6, 12, lo que fai que tovía usemos la docena de güevos, que podemos repartir ente dos, tres, cuatro o seis persones, dando a caún el mesmu número. Los números 60 o 90 tamién son afayadizos, con munchos divisores, y por eso s'usen, ente otres razones, al medir el tiempu o los ángulos. Los números primos son tolo contrario: como viemos na definición, nun se puen dividir. Si tenemos 11 güevos y queremos repartilos de forma equitativa, o queda una persona con toos, o buscamos 11 persones. Toi casi convencíu de que la mala fama del 13 tien algo que ver con que seya primu. Sicasí, los primos tienen una propiedá bien guapa, qu'amuesa'l teorema que vien darréu.

TEOREMA FUNDAMENTAL DE L'ARITMÉTICA
Tou número natural mayor que 1 pue espresase de manera única (sacante reordenación) como productu de números primos

Por exemplu:

$$36 = 3 * 3 * 2 * 2$$

Si lo ponemos como productu de divisores posibles, la espresión nun ye única:

$$36 = 6 * 6 = 4 * 3 * 3 = 2 * 6 * 3 = \dots$$

Si tenemos un número espresáu como productu de divisores y estos nun son primos, siempre podemos dir descomponiendo estos factores nos sos divisores hasta llegar, nun número finitu de pasos, a los factores primos. La espresión ye única porque si hubiese un primu, q_i , qu'apaez nuna primer descomposición y non n'otra, la primera sedría divisible por q_i y la segunda non —al ser los sos factores primos distintos a q_i — esto ye imposible dao que les dos espresiones son iguales al mesmu número. Amás, 1 tien de dexase fuera como primu porque sinón, tendríamos

$$45 = 3 * 3 * 5 * 1 = 3 * 3 * 5 * 1 * 1 = \dots,$$

formes non úniques.

Esti resultáu al rodiu de los primos apaez yá nos *Elementos d'Euclides* (Proposición 14 del Llibru 9); ye dicir, conociase a lo menos hacia l'año 300 a.C.

Esti teorema ye de gran importancia porque amuesa que los primos son como los átomos del sistema de números naturales: combinándolos xeneramos tolos números. El número d'átomos distintos en Química ye finitu, los que

carautericen cada elementu químicu. La entruiga obvia ye: ¿hai un número finitu o infinitu de primos?

TEOREMA D'EUCLIDES

Hai infinitos números primos

La prueba ye cenciella. Procédese por reducción al absurdu: imaxinemos qu'hai un número finitu de primos, entós habría un primu máximu, l'enésimu primu p_n .

Construyamos el número

$$p = p_1 * p_2 * p_3 * \dots * p_n + 1$$

Esti número, 1, más el productu de tolos primos anteriores a p_n y el propiu p_n , nun ye divisible por nengún d'estos primos —si lu dividimos queda de restu 1— y polo tanto ye primu y claramente mayor que p_n . Asina que lleguemos a una contradicción. Nun pue haber un número finitu de primos. Esti resultáu ye la Proposición 20 del Llibru 9 de los *Elementos* y la prueba d'Euclides ye asemeyada a la qu'escribí, magar él utilizó un llinguaxe más xeométricu.

Esto llévanos a la siguiente cuestión: ¿cómo se busquen números primos?, ¿cómo se construyen números primos mui grandes? Na sección dedicada a les aplicaciones de los primos vamos ver que buscar números primos mui grandes ye importante n'aplicaciones estremaes, sobre manera na criptografía, desarrollándose claves imposibles de romper al traviés del usu de números primos escomanaos o'l so productu. Asina qu'agora vamos ver cómo buscalos ya iguales.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

LA CRIBA D'ERATÓSTENES

¿Cómo buscamos números primos? Lo primero que se nos ocurre sería ver si un número determináu, por exemplu 49, ye primu. Pa ello vamos dividilu por tolos sos primos iguales o menores que la so raíz cuadrada —si'l número ye divisible por un número primu mayor que la so raíz cuadrada, tamién sería divisible por un primu menor— asina 49 nun ye divisible por 2, nin por 3, nin por 5, pero sí por 7, polo tanto nun ye primu. Haciendo lo mesmo con 53 vamos comprobar que sí ye primu. Sicasí, construir una llista de primos d'esta manera, probando número a número ye mui llargo ya ineficiente. Nicómaco de Gerasa (60–120 d.C.), un matemáticu griegu, espublizó un métodu muncho meyor nes sos *Leciones d'Aritmética*. El citáu autor asocia'l métodu a Eratóstenes de Cirene (276 a.C.–195/194 a.C.),

Figura 1. Representación de La criba d'Eratóstenes

el gran matemáticu y científicu griegu que foi ún de los direutores de la Biblioteca d'Alexandría. El métodu ye mui cenciellu y eficaz. Como tou número non primu tien de ser múltiplu d'un primu, partimos de los primeros primos y vamos eliminando los sos múltiplos: los números que vayan quedando van ser, necesariamente, primos. Lo que hacemos ye dalgo asina como dir cribando números pa que nos queden los valiosos, los primos, como si usáremos una peñera pa separar pebides d'oru del agua d'un ríu; ye polo qu'esti métodu se llama La criba d'Eratóstenes. Vamos ver cómo funciona p'atopar tolos primos menores que 100. Propongo qu'escribáis una llista de números del 1 al 100 en fileres de 10 números. Primeramente, hai d'eliminar tolos múltiplos de 2; ye dicir, los pares. Dempués, táchense los múltiplos de tres —van tachándose simplemente números de 3 en 3 hasta llegar al 99—. Los múltiplos de 5 son los números que terminen en 0 o en 5: elimínense tamién. Siguiamos colos de 7, equí yá tachamos namás tres nuevos, 49, 77 y 91. Col siguiente primu 11, yá nun tachamos nengún nuevu menor que 100, dao que'l siguiente número compuestu elimináu sería 121. Asina quedamos cola llista de 25 primos menores que 100.

- 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97

Podemos ver que'l métodu ye mui simple, pero non del too eficiente, porque hai números que tachamos dos veces (como 12 o 40) o hasta 3 veces (por exemplu 30 o 60). Podríamos mejorar el métodu eliminando nun entamu tolos múltiplos de 2, 3 y 5. Dempués, pasamos a 7 y yá empezamos en $49 = 7 * 7$, dao que los números compuestos anteriores yá tán tachaos, al ser múltiplos de los primos menores que 7.

Dempués, multiplicamos 7 por números que nun seyan múltiplos de 2, 3 o 5 —a estos números llámaselos coprimos—, y esto llévanos a quitar 49, 77 y 91 ensin volver a tachar nengún. Esti métodu llámase «factorización en rueda» y permítenos realizar menos operaciones, siendo mui útil si consideramos los primos hasta números mui grandes.

Otres cribes que s'usen p'alcontrar primos ente dos números mui grandes son les llamaes segmentaes que dividen el rangu de busca en dellos cachos usando dempués métodos como l'anterior. La gran ventaya ye que'l programa informáticu usáu tien requerimientos de memoria muncho menores.

Anguaño, úsense métodos mui estremaos y sofisticaos pa buscar primos mui grandes nun intervalu. Dalgunos d'estos métodos son probabilísticos; ye dicir, damos números que son primos con una altísima probabilidad, pero ensin la total certidume.

PRIMOS DE MERSENNE. NÚMEROS PERFEUTOS, PRIMOS XIMIELGOS

Marin Mersenne foi un matemáticu y filósofu francés que tuvo amistá y correspondencia con figures científiques destacaes de la época como Descartes, Fermat o Galileo. Trabayó colos números primos y la teoría del soníu, siendo conocíu como «El pá de l'acústica». Tuvo dientro de la orde relixosa de los Mínimos, fundada por San Francisco de Paula, llamaos asina por tentar de vivir colo mínimo, haciendo una vida mui austera.

Mersenne construyó los llamaos primos de Mersenne, que s'escriben como:

$$M_p = 2^p - 1$$



Figura 2. Marin Mersenne (1588–1648)

Pa que M_p seya primu, p tien de selo, pero que p lo seya nun garantiza que M_p tamién seya primu. Asina, tenemos la llista de primos de Mersenne que sigue darréu:

$$\begin{aligned} p = 2, M_p &= 3 \\ p = 3, M_p &= 7 \\ p = 5, M_p &= 31 \\ p = 7, M_p &= 127 \end{aligned}$$

Como se pue ver, nesta llista van apaeciendo primos, pero nun tán, nin mucho menos, tolos que conocemos. Falten 11, 13, 17, 19... Si p nun ye primu, el número $2^p - 1$ nun lo ye tampoco. Exemplan: $p = 4, 2^4 - 1 = 15$.

Ún podría pensar que con esta fórmula siempre s'algamaría un primu. Llamentablemente, esto nun ye cierto:

$$p = 11, M_p = 2^{11} - 1 = 2047 = 23 * 89$$

De toles maneras, la fórmula permítenos dir xenerando primos mui grandes rápidamente

$$p = 31, M_p = 2.147.486.647,$$

que ye primu.

Anguaño, la fórmula úsase pa xenerar los números primos más grandes. Pa ello emplégase una rede de computadores per tol mundu que trabayen a comuña nos cálculos del proyeutu GIMPS (Great Internet Mersenne Prime Search), Gran Busca de Primos de Mersenne n'Internet.

Luke Durant algamó asina'l mayor número primu conocíu hasta agora en 2024. Ye un primu de Mersenne

$$2^{136.279.841} - 1$$

Los años 2027, 2029 formen una pareja de primos ximielgos. La siguiente va ser 2081, 2083

Esti número tien unos 41 millones de díxitos. ¡Nun tentéis de probar que ye primu! Pa facelo utilízase l'algoritmu de Lucas-Lehmer, válidu namás pa números de Mersenne. Nun se sabe tovía si hai un número infinitu de primos de Mersenne. Hasta'l momentu calculáronse 52, siendo'l mayor l'escritu anteriormente. Existe una conexón curiosa ente los primos de Mersenne y otros números mui interesantes, los números perfectos.

Los números perfectos son aquellos que puen escribise como suma de los sos divisores, ensin incluyir el propiu número. Exemplos:

$$\begin{aligned} 6 &= 1 + 2 + 3 \\ 28 &= 1 + 2 + 4 + 7 + 14 \\ 496 &= 1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 31 + 62 + 124 + 248 \end{aligned}$$

D'esta manera, estos números nun son nada habituales. Los siguientes son 8.128 y 33.550.336. Ta probao que tolos números perfectos conocíos son pares. De fechu, Euler (1707-1783) probó que tou número perfectu par pue escribise como

$$2^{p-1} * (2^p - 1),$$

siendo $2^p - 1$ un primu de Mersenne. Amás, con esa fórmula, tou primu de Mersenne da llugar a un número perfectu. Sicasí, nun se probó tovía que nun existan números perfectos impares, anque nun se conoz nengún. El mayor número perfectu conocíu ye'l que s'algama a partir del mayor primu de Mersenne que se conoz. Sedría entós:

$$2^{136.279.840} * (2^{136.279.841} - 1)$$

Como ye a vese, el número tien una barbaridá de díxitos.

Otros números perinteresantes son los que se llamen «primos ximielgos», ye dicir, pareyes de primos que tienen una diferencia de dos, $p - 1, p + 1$, siendo p un número par.

Exemplu:

- 3, 5
- 5, 7
- 11, 13
- 17, 19
- 29, 31
- 41, 43

Los años 2027, 2029 formen una pareja de primos ximielgos. La siguiente va ser 2081, 2083. Pue vese qu'al medrar el número de díxitos, échense en falta los primos ximielgos.

El novelista Paolo Giordano usa la metáfora de los primos ximielgos pa referise a la rellación ente los protagonistas de la so novela *La soledá de los números primos*. Mattia piensa que la so rellación con Alice ye como la de dos primos ximielgos, solos y perdíos, xuntos pero non bastante como pa tocarse de verdá.

A la entruga de si hai pareyes infinites de primos ximielgos, la respuesta ye: nun se sabe. La conxetura de los primos ximielgos diznos qu'hai infinitos, pero ta ensin demostrar. Sabemos gracias a un teorema probáu por Yitang Zhang en 2013 qu'existe un N enteru menor que $70 * 10^6$ tal qu'existen pareyes infinites de primos con diferencia N . Esta cota rebaxóse a 246, y ehí quedó. Les pareyes de primos ximielgos han de ser (nun siendo la primera) de la forma $6n - 1, 6n + 1$. De fechu, tolos primos, nun siendo 2 y 3

son axacentes a un múltiplo de 6. Pa $n > 1$, les pareyes de primos ximielgos, $6n - 1$, $6n + 1$, namás se dan si la última cifra de n ye 0, 2, 3, 5, 7, 8. La pareya de primos ximielgos más grande conocida ye

$$(2.996.863.034.895 * 2^{1.290.000} - 1, 2.996.863.034.895 * 2^{1.290.000} + 1),$$

descubierta en 2016. Finalmente, llámense primos aisllaos los que nun formen parte d'una pareya de ximielgos. Probóse un resultáu que nos diz que'l cociente ente'l número de primos aisllaos menores que n y el número total de primos tiende a 1 cuando n tiende a infinitu. Ye dicir; nesti sentíu los primos en pareyes son mui pocos. Darréu vamos estudiar cómo tán distribuyíos los números primos; ye dicir, si son aleatorios o existe dalguna llei que nos permita producilos. Vamos ver que la situación ye, de dalguna forma, intermedia.

DISTRIBUCIÓN DE LOS NÚMEROS PRIMOS.

EL TEOREMA DE LOS NÚMEROS PRIMOS

Anque Euler (1707-1783) y Lagrange (1736-1813) yá suxirieron esa aproximación, foron el matemáticu francés Hadamard (1865-1963) y el matemáticu belga De la Vallée Poussin (1866-1962) los que probaron en 1986 el llamáu Teorema de los Números Primos.

TEOREMA DE LOS NÚMEROS PRIMOS

Si llamamos $\Pi(x)$ al número de primos menor o igual qu'un número x , cúmplese que

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\Pi(x)}{x/\log(x)} = 1$$

Ye dicir, cuando $x \rightarrow \infty$ (x tiende a infinitu) el número de primos pue aproximase como'l

cociente de x y el logaritmu neperianu de x , o dicho d'otra manera, el número de primos nun crez de manera llinial con x sinón qu'hai un pesu de la forma $1/\log(x)$.

Ensin entrar nel significáu del logaritmu neperianu, podemos dicir qu'esti reflexa'l número de díxitos del número, asina que'l número de primos medra con x pero esti aumentu ta dividíu por una cifra que depende del so número de díxitos. El cociente ente $\Pi(x)$ y x —la proporción de primos—mengua como $1/\log(x)$, de crez d'alcuerdu col número de díxitos de x . Al dir considerando números cada vez mayores, la proporción de primos va diminuyendo. Asina ente 1 y 1000 hai 168 primos, pero nel intervalu d'igual llonxítu ente 1.000.000 y 1.001.000 namás hai 49.

Como consecuencia d'esti teorema o como otra forma d'escribilo, l'enésimu número primu p_n pue aproximase por $n * \log(n)$. Ye dicir

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p_n}{n * \log(n)} = 1$$

La prueba d'esti teorema ye mui complicada al requerir l'usu de la función $\zeta(s)$, la famosa zeta de Riemann.

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$$

siendo Σ el sumatoriu sobre tolos naturales. Hai una conexón ente esta función y los números primos al traviés de la fórmula d'Euler

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \prod_{p \text{ prime}} (1/(1 - p^{-s}))$$

onde Π ye'l productu sobre tolos primos. Los ceros de la ζ de Riemann xueguen un papel destacáu na demostración del Teorema de los

números primos, indicando un ciertu patrón na distribución de los primos.

Vamos amosar cómo de bona ye la primer aproximación con dalgunos valores de x . Vamos escribir l'error relativu pal número de primos real y el que nos da la fórmula.

$$\begin{aligned} x = 103, \text{ error} &= 13.3 \% \\ x = 104, \text{ error} &= 11.6 \% \\ x = 106, \text{ error} &= 7.8 \% \\ x = 1012, \text{ error} &= 5.1 \% \end{aligned}$$

L'error relativu va tendiendo a cero, pero de manera mui lenta. Esti ye'l motivu pol que se buscaron aproximaciones meyores. Pue probase que la integral logarítmica nos da una meyor aproximación. Cúmplese que

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\Pi(x)}{\int_2^x (1/\log(t))dt} = 1$$

La integral logarítmica ye la qu'apaez nel denominador y representa l'área llendada pola curva $1/\log(t)$ y l'axe OX ente 2 y x . El resultáu danos una aproximación más fina que la del teorema de los números primos. Existen cotes óptimes sobre l'error absolutu d'esta aproximación, estes cotes dependen de que se satisfaga la hipótesis de Riemann, una conjetura sobre los ceros de la función de Riemann que tovía nun se probó y que constitúi ún de los problemes abiertos más importantes de les matemátiques. De toles maneres, podemos ver lo bona que ye esta aproximación dando los errores relativos ente'l número de primos real y el que nos da la fórmula.

$$\begin{aligned} x = 103, \text{ error} &= 5.6 \% \\ x = 104, \text{ error} &= 1.4 \% \\ x = 106, \text{ error} &= 0.16 \% \\ x = 1012, \text{ error} &= 10-4 \% \end{aligned}$$

Como pue vese, l'aproximación ye escelente. Hai que recordar, sicasí, que ye una fórmula aproximada y nun hai una fórmula exauta que nos dea'l número de primos menores que x . Los primos nun tán determinaos d'antemano o, a lo menos, nun sabemos determinalos pero sí aproximalos.

LA CONJETURA DE GOLDBACH

Christian Goldbach foi un matemáticu amigu de Leonhard Euler (1707-1783). Euler, consideráu como ún de los matemáticos más importantes de la historia, mantenía correspondencia con Goldbach y la conjetura apaez suxerida por Goldbach nel so intercambiéu epistolar. El párrafu de la carta ta escritu nuna mezcla interesante d'alemán y llatín. El conteníu de la conjetura ye mui cenciellu:

Conjetura de Goldbach: tou número par mayor que 2 pue expresase como la suma de dos primos

Por exemplu:

$$\begin{aligned} 4 &= 2 + 2 \\ 16 &= 11 + 5 \\ 80 &= 43 + 37 \end{aligned}$$

Magar la so cenciellez, esti resultáu nun pudo probase tovía. Usando cálculu computacional, la conjetura probóse pa tolos pares menores o iguales que $4 * 10^{18}$ lo que paez indicar que ye cierta. Sicasí, los nuestos llectores tienen de recordar que la prueba tien de valir pa números pares infinitos, asina una prueba típica sedría partir de qu'hai un número par que nun pue espresase como la suma de dos primos y llegar por pura lóxica a una contradicción. Esto ye difícilísimo. Vamos ver agora que sí hubo progresu

dende los tiempos de Goldbach y pa ello vamos escribir la

Conjetura débil de Goldbach: tou número impar mayor que 5 pue espresase como la suma de tres primos

Si la conjetura sobre los pares —qu'agora llamaremos conjetura fuerte de Goldbach— ye cierta, la conjetura débil tamién lo ye. Esto ye fácil de probar porque podemos escribir tolos impares a partir de 7 como 3 más un número par. Si'l par ye la suma de dos primos, l'impar sedrá la suma de 3. Exemplos:

$$7 = 3 + 4 = 3 + 2 + 2$$

$$11 = 3 + 8 = 3 + 5 + 3$$

Sicasí, si la conjetura débil ye válida, la fuerte nun tien por qué selo. En Matemáticas, el términu fuerte refierse a una proposición más xeneral con respeto a otra, débil, menos xeneral.

Pues bien, ye na conjetura débil onde se fixeron progresos definitivos dende l'artículu de Tao de 2007. La conjetura débil probóse en 2013 pol matemáticu peruanu Harald Helfgott. Lo sorprendente ye que la prueba, de gran dificultá, aceptóse como válida por una revista, *Annals of Mathematical Studies*, pero tovía nun se publicó n'ella, pudiendo consultala namás n'internet. Suponemos que suxeriríen dalgunos cambeos nel artículu que tovía nun se fadríen, dada la dificultá estrema del tema y la existencia de poques persones que puedan entender la prueba. De toles maneres, la conjetura débil considérase probada y como consecuencia d'esta probóse tamién que tou número par mayor que 2 pue ponese como la suma de 4 primos como máximo. Ye dicir, paez que queda un percorríu curtiu pa la prueba definitiva de la



Figura 3. Christian Goldbach (1690–1764)

conjetura fuerte, aunque quiciás seya un camín mui complicáu.

Otru resultáu interesante relativu a la conjetura fuerte ye'l que probó'l matemáticu chinu Chen Yingrun nel 1973: tou número par suficientemente grande pue escribise como la suma de dos primos o como la suma d'un primu y un

semiprimu (productu de los primos). Esta se-dría otra forma d'averase a la conjetura fuerte de Goldbach.

Na lliteratura, la conjetura de Goldbach apaez como tema central de la novela *El tío Petros y la conjetura de Goldbach* del escritor griegu Apostolos Doxiadis.

SOBRE LA UTILIDAD DE LOS NÚMEROS PRIMOS

Hasta va poco, los números primos grandes nun tuvieron un usu prácticu importante. Sicasí, col entamu del emplegu de sistemas de comunicación basaos n'ordenadores, fíxose necesario y posible unviar claves secretas —como les del bancu o les tarxetes de creitu pa facer pagos—, firmar documentos dixitalmente o unviar mensaxes per internet que nun puedan descrifrar terceres persones. Voi comentar brevemente dos métodos que s'usen davezu pa estes xeres.

Los dos básense na llamada aritmética modular, na que se faen delles operaciones con números naturales, trabayándose col restu de la división por un número. Nel casu del métodu de Diffie-Hellmann (1976) existen dos claves públiques: un número primu mui grande p y otu número g , que se llama «una raíz primitiva módulu p », y que s'escueye de manera afayadiza. Les dos persones qu'intercambien los mensaxes, Xuacu y Lena, tamién tienen les sos propies claves secretas, los números a y b . Xuacu calcula'l restu de dividir el número g^a por p , que se conoz téunicamente como $g^a \bmod p$, g^a módulu p , llamemos A a esi número que Xuacu unvia a Lena.

$$A = g^a \bmod p$$

Lena calcula'l restu de dividir g^b por p y unvia esti número B a Xuacu.

$$B = g^b \bmod p$$

Darréu, Xuacu calcula'l restu de dividir B^a por p que sedrá un número s .

$$s = B^a \bmod p$$

y Lena'l restu de dividir A^b por p que, maraviyes de l'aritmética modular, ye'l mesmu número s .

$$s = A^b \bmod p$$

D'esta manera dambos tienen una clave compartida s . Si agora Lena quier unviar un mensaxe a Xuacu —un número C , por exemplu—, podría multiplicar $C * s$ y mandar el resultáu. Xuacu namás tendría que dividir esi resultáu por s pa obtener C . Esto último ye una simplificación, pudiendo usase otres operaciones. El casu ye qu'a partir de tolos números calculaos que se comparten per internet ye casi imposible atopar la clave compartida. Esto débese a que'l número que s'usa ye un primu mui grande y na aritmética modular calcular les claves secre-

tes a partir de les operaciones d'esponenciación feches y que circulen per internet ye difícilísimo.

N'otru métodu, RSA (Rivest, Shamir & Adleman, 1978), en vez d'usar un primu mui grande usen el productu de dos primos mui grandes y faen operaciones d'esponenciación quedando col restu al dividir pol productu de los primos. Mientres que Diffie-Hellman s'usa pa comunicaciones segures, RSA úsase más pa firmes dixitales. Anguaño, buscar primos grandes ye un negociu, como lo ye desenvolver algoritmos de cifráu basaos en números primos.

Un segundu motivu pol que los números primos resulten útiles ye'l de probar algoritmos eficientes pa buscalos o estudiar conxetures sobre ellos. Sirven pa poner a prueba la capacidá de los ordenadores más potentes y de los meyores programadores. Ye un poco como poner a prueba un Fórmula 1 nun trazáu mui exigente. Tamién permiten combinar el trabayu d'ordenadores en rede como na busca de primos en Mersenne.

Una tercer utilidá, qu'existió siempre, ye la de despertar l'interés matemática y científica en neños y mozos. Trabayar en problemes que puen ser abstractos exercita la mente pa estremaes xeres inteleutuales. Xeres que puen tener un inte-

rés prácticu. Anguaño ye habitual qu'empresas y bancos contraten a matemáticos pola so capacidá pa resolver problemes. ¿Quién-y diba a decir a Mersenne que los sos primos tendríen utilidá nel mundu del comerciu? Siendo un Mínimu, nun sé si-y diba a gustar muncho.

La narcolepsia na etapa infantil y xuvenil



Por **Xesús González Rato**

Mélicu Neurofisiólicu

Unidá de Sueñu del Serviciu de Neurofisioloxía Clínica

Hospital Universitariu Central d'Asturies (HUCA)

DEFINICIÓN Y PREVALENCIA

La narcolepsia ye un trestornu neurolóxicu raru ya invalidante carauterizáu por una desregulación de les llendes ente'l sueño y la vixilia. Si bien ye poco frecuente, ocasiona un impautu considerable na vida diaria del paciente, sobre manera si falamos d'ello na edá infantil. Básicamente presenta los mesmos síntomas que nos adultos, pero con delles carauterístiques diferenciadores que van tratase más alantre.

Na población europea occidental, que ye'l nuestro ámbitu, estímase qu'afeuta a un 0,02-0,18 % de los habitantes, con igualdá ente sexos (paez que dalgo más frecuente nel masculín, pero la diferencia ye mínima), masque na población infantil y adolescente inda nun ta bien determinada.

Tien una edá d'aniciu bimodal, esto ye, con dos picos máximos d'incidencia a los 15 y a los 35 años, magar que, de xeneral, suel retrasase'l so diagnósticu hasta los 12 años o más por cuenta de la probe reconocencia de los síntomas tanto per parte de los propios pacientes como de los profesionales médicos que nos soliciten conseyu a los especialistas del sueño.

Acordies cola tercer y vixente edición de la Clasificación Internacional de les Enfermedaes del Sueño (ICSD-3, International Classification of Sleep Disorders, 3rd edition), la narcolepsia pue dividise en dos tribes. La narcolepsia de triba 1 o con cataplexa, y la narcolepsia de triba 2 o ensin cataplexa. Arriendes de la presencia o ausencia de cataplexa, los síntomas comunes a dambes tribes son:

- Escesu d'adormecimientu a lo llargo'l día.
- Alteración del sueño nocherniegu.
- Inxertamientu de sueño REM dientro de la vixilia: en forma de parálisis del sueño y allucinaciones hipnagóxicas y hipnómpicas.

- De normal, nun suelen presentase toles manifestaciones clínicas al empar, sobre manera na población infantil y xuvenil, pudiendo amás identificase variaciones sutiles na presentación de los síntomas.

La narcolepsia ye un trestornu neurolóxicu raru ya invalidante carauterizáu por una desregulación de les llendes ente'l sueño y la vixilia. Si bien ye poco frecuente, ocasiona un impautu considerable na vida diaria del paciente, sobre manera si falamos d'ello na edá infantil

SINTOMATOLOXÍA

1) Adormecimientu diurnu escesivu

Ye'l síntoma más frecuente de toos. La ICSD-3 defínelu como periodos diarios de necesidá irresistible de dormir o de sueño, a lo llargo de lo menos tres meses.

En neños pue ser difícil de distinguir de la necesidá normal d'echar un pigazu. Amás, non siempre ye obvio; pue presentase como nueches de sueño llargues por demás o bien como la continuación de pigazos diurnos interrumpíos con anterioridá. Tamién ye típico nos neños la «inercia de sueño», que se carauteriza por un escesu d'agresividá y una tendencia a seguir dormíos al tentar d'espertalos. Los ataques de sueño son más llargos y menos reparadores que nos adultos, y hai vegaes qu'únicamente se presenten como un aumentu de la irritadura, un aisllamientu social o, a cencielles, timidez.

N'adolescentes pue ser difícil de distinguir de la falta crónica de sueño, tan frecuente nesta

etapa de la vida, o de vezos non adecuados de sueño. Hasta pue confundise con galbana o con mal comportamientu per parte de los profesores, por cuenta de que pasen en clas más de la metá'l tiempu con una actitú pasiva y sedentaria (Figura 1a).

2) Alteración del sueño nocherniegu

Los pacientes narcolépticos tienen un sueño alteráu a lo llargo tola nueche, con espertares frecuentes y fragmentación del sueño, nun afondando abondo n'etapes más reparadores del ciclu del sueño.

3) Inxertamientu de sueño REM

Ye normal qu'estos pacientes entren en fase REM más rápido que la población xeneral; ye mui frecuente qu'apaeza sueño REM al aniciu del sueño, cuando de normal suel tardar d'una a dos hores en presentase. El sueño REM ye la etapa más fonda del ciclu del sueño, onde se produz la reparación psíquica del individu. Ye la parte del sueño na que se producen los sueños y les veles.

Les anomalíes más carauterístiques d'esti síntoma son:

- Allucinaciones hipnagóxicas y hipnómpicas: l'individu ve o siente bichos, animales o persones nel cuartu de dormir nel momentu ente la vixilia y el sueño (hipnagóxicas, al entamu la nueche), o nel momentu ente'l sueño y la vixilia (hipnómpicas, al espertar). Puen ser tan realistes que los neños apavorien (Figura 1.b).
- Parálisis del sueño: al espertar, el neñu ta al mesmu tiempu nun estáu de vixilia y nun periodu de sueño, polo que ta consciente pero nun ye a movese nin a falar, suponiendo una situación bien angustiada. Duren

dende segundos hasta minutos, y dan fin de forma espontánea.

Hai neños que puen experimentar movimientos escesivos nel sueño REM, dalgo non habitual nes persones sanes, onde suel haber una falta de tonu muscular y, poro, nun hai movimientos.

La naturaleza rara d'estos sueños pue confundir al neñu y facer que-y dea vergoña comunicar los fenómenos nocherniegos.

4) Cataplexa

Apaez namás na triba 1 de la narcolepsia, constituyendo un 60-75 % de los neños diagnósticos. Pue presentase hasta selmanes o años después del aniciu del adormecimientu diurnu.

Defínese como una perda repentina, temporal y curtia del tonu muscular, que vien provocada por emociones, de normal positives, como rise al escuchar un chiste, por casu. En neños pue ocurrir de forma espontánea, mesmo ensin el factor provocador. La respiración y los movimientos de los güeyos caltiénense siempre, y tán espertos en tou momentu. Ye mui típico qu'a estos neños los reñan cuando asoceden nes actividaes deportives o nel comedor de la escuela.

Ye carauterístico que se manifieste nos neños cola denomada «facies catapléctica», onde vemos una hipotonía facial, tosis (cayida de los párpagos), apertura de la boca y salida de la llingua fuera de la cavidá bucal. Puen asociase discinesies o distoníes (movimientos anormales de los músculos de la cara).

Según el neñu va medrando, la presentación de la cataplexa va convirtiéndose na habitual que tienen los adultos que carecen de narcolepsia, que ye la perda del tonu de los músculos de tol cuerpu, de mou y manera que son frecuentes les cayíes al suelu ensin perder la consciencia (Figura 1c). Esti aspectu ye lo que lo distingue del encayamientu.



IZQUIERDA

Figura 1a, 1b y 1c. Los tres síntomas principales de la narcolepsia. a. Adormecimiento diurno excesivo, que nes aules pue confundise con galbana o inatención. b. Allucinaciones hipnagóxicas o hipnopómpiques, que se producen al inxertase'l sueñu dientro la consciencia («suañar espiertu»). c. Cataplexa, una perda del tonu (la fuerzia) de los músculos.

5) Otros manifestaciones

Otros síntomas que puen apaecer son:

- Comportamentu automáticu: faen xeres ensin ser quien a acordase del procesu de tar faciéndoles.
- Cambeos metabólicos y endocrinos: más del 50 % de los neños carecen d'obesidá. Nun 17 % de los casos apaerz una pubertá prematura.
- Movimientos periódicos de les estremidaes: ye frecuente na población infantil. Suelen asociase a valores baxos de ferritina nel sangre, lo que fai necesario alministra-yos suplementos de fierro pa evitalo.
- Alteraciones sicosociales: dificultá de concentración, alteración del humor, problemes sociales, trestornu de déficit d'atención-hiperactividá, comportamentu agresivu, depresión y ansiedá.

FISIOPATOLOXÍA

Los mecanismos pelos que se xenera esta patoloxía son diferentes en cada triba de narcolepsia.

No tocante a la **narcolepsia triba 1**, tiense visto qu'hai un mezigayu ente factores xenéticos y factores ambientales.

- Xenéticos: nun 98 % de los pacientes d'esti grupu vióse la presencia del xen HLA DQB1*06:02 constituyendo, poro, ún de los criterios pal so diagnósticu. Sicasí, d'un 13 a 38 % de los individuos sanos tamién lu tienen positivu, pero nesti casu nun hai sintomatoloxía nenguna. La presencia d'esti xen lleva a que, depués d'una infeición que xenera una rempuesta inmune importante, se produza un procesu autoinmune que provoca la destrucción de les neurones productores d'hipocretina-1 (tamién denomada orexina) nel hipotálamu del encéfal (una parte fonda del cerebru). Esta hormona ye promotora de la vixilia, ye dicir, activa los centros neurológicos del espertar y corta l'aición de la melatonina (la hormona que promueve'l sueñu), polo que la so falta induz un estáu de sueñu excesivu.

- Ambientales: en bien d'estudios quedó evidenciado que l'estrés psicolóxicu, un cambéu repentinu de los patrones del sueñu, un traumatismu craneoencefálicu o delles infeiciones (estreptococosis, gripe estacional, etc.) tamién puen inducir l'apaición de narcolepsia.

No que toca a la **narcolepsia triba 2**, el mecanismu d'apaición inda nun ta bien estudiáu y la fisiopatoloxía ye más heteroxénea.

DIAGNÓSTICU

Anguaño dispónense d'unes cuantes erbies pa poder facer el diagnósticu más aceñeru de la narcolepsia.

1) Escalas de sueñu

Son cuestionarios qu'evalúen la cantidá d'escasu de sueñu o la probabilidad de carer narcolepsia. Hai un garapiellu d'escalas que tán adautaes a la población infantil y xuvenil, ente les que rescampen:

- Escala de somnolencia Epworth pa neños y mogotes (ESS-CHAD, *Epworth Sleepiness Scale for Children and Adolescents*).

- Escala de somnolencia diurna pediátrica (PDSS, *Pediatric Daytime Sleepiness Scale*).
- Encuesta d'hipersomnolencia pediátrica (PHS, *Pediatric Hypersomnolence Survey*).
- Escala de Narcolepsia de Ullanlinna (UNS, *Ullanlinna Narcolepsy Scale*).

Trátase d'encuestes que va respondiendo'l paciente o los sos padres, resultando un valor numéricu qu'axuda a perfilar entá más la sintomatoloxía del paciente al dar una mayor o menor probabilidad de carecer de narcolepsia.

2) Axenda de sueñu

Ye un métodu suxetivu, por cuenta de que confía nos detalles qu'aporten los pacientes o los sos pas. Poro, pue haber un sesgu nos datos consiguíos. Consiste nuna representación gráfica (Figura 2) de los asocedíos del sueñu del neñu o adolescente a lo llargo de dos selmanes, espeyando nella delles variables y parámetros qu'axuden a facese una idea de cómo foi'l sueñu del paciente nesi tiempu. Mídese la hora de chucase na cama, la hora de

llevar d'ella, el tiempu que tarda en dormise (lataencia del sueñu), los espertares que tuvo a lo llargo la nueche, si s'echaron pigazos, etc.

3) Actigrafía

Consíguense los mesmos datos que cola axenda de sueñu, pero nesti casu trátese d'un métodu oxetivu, por cuenta de que se fai per aciu del actígrafu, un dispositivu con forma de reloj de muñeca que monitoriza los parámetros midíos; ye un poco lo que faen anguaño los relojes intelixentes que miden más parámetros y tán compuestos con sensores de calidá profesional adautaos al ámbitu sanitariu. Tamién se rexistra a lo llargo de dos selmanes siguies, quitándolu namás cuando'l paciente se ducha.

Consta de sensores de movimientu, de lluz ambiente, de temperatura y de saturación d'oxíxenu, y los datos atropaos represéntense nun actigrama como'l que se pue ver na Figura 3. Llógrense midies oxetives de la llatencia, eficiencia y tiempu total de sueñu, los espertares y la duración media d'estos.

4) Pruebas de llaboratoriu

Al traviés d'un análisis del sangre pue consigui-se l'estudiu xenéticu del HLA-DQB1*06:02, yá mentáu enantes, siendo útil sobre manera nos casos de narcolepsia de triba 1 (98 % positivos nesti grupu). Sicasí, hai que tener en cuenta que tamién pue ser positivu nun porcentaxe d'ente'l 13 y el 35 % de la población xeneral.

SERVICIO DE SALUD DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS
SERVICIO DE NEUROFISIOLOGÍA CLÍNICA – UNIDAD DEL SUEÑO

AGENDA DEL SUEÑO

CADA MAÑANA HAGA LA SIGUIENTE TAREA (vea el ejemplo más abajo):

- 1) Escriba el día de la semana y la fecha. Si es mujer marque con un asterisco los días correspondientes a la menstruación
- 2) Si trabaja a turnos, marque N para nocturno, M para mañana y T para tarde
- 3) Con una flecha hacia abajo marque la hora a la que se acostó
- 4) Con una línea vertical gruesa marque la hora a la que se durmió
- 5) Marque con una raya horizontal cuántas veces se despertó durante la noche
- 6) Con una línea vertical gruesa marque la hora a la que se despertó
- 7) Con una flecha hacia arriba marque la hora a la que se levantó
- 8) Si durante el día dio alguna cabezada, márzuela con la letra C
- 9) Si hizo siesta marque con paréntesis el periodo de tiempo que durmió, con una letra S dentro de los mismos

No lleve anotaciones en el momento. Marque los datos tal como los recuerda por la mañana. Si lo necesita, anote comentarios al reverso de esta hoja. Este es su diario de sueño. Durante la menstruación, anote un asterisco () a la izquierda de cada uno de los días que la tiene.*

Ejemplo:

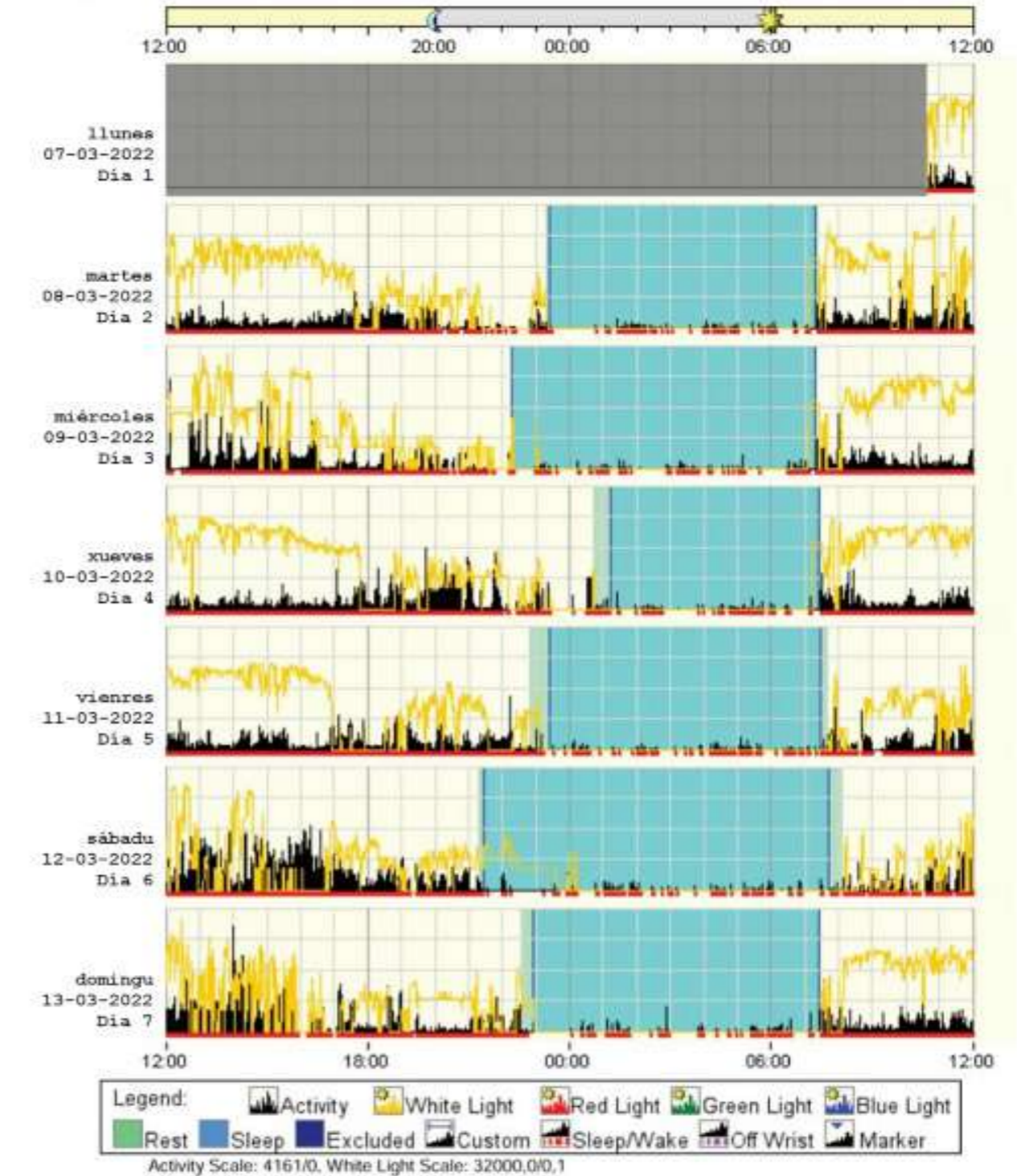
Día	Fecha	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Dom	21-04-11																									

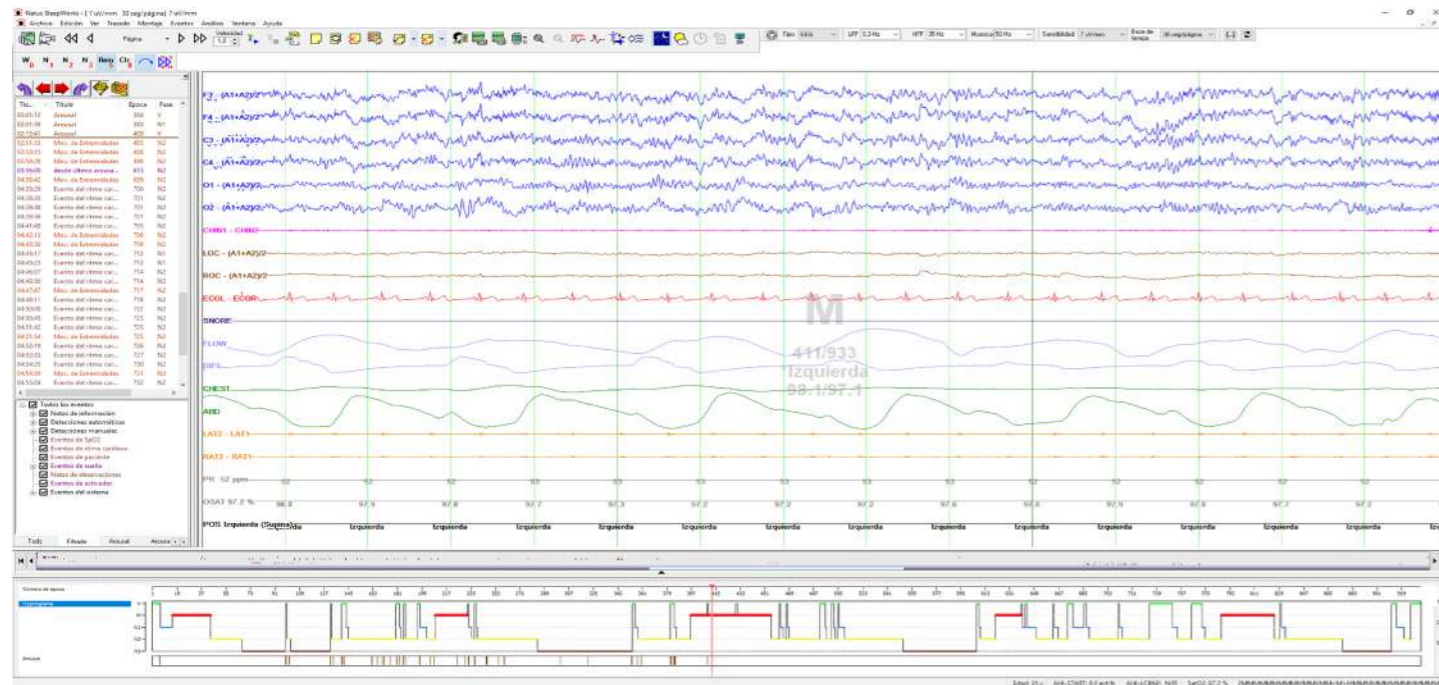
¿Cuántos minutos tardó en dormirse?
 ¿Tomó algo para dormir?
 ¿Cuántas veces se despertó?
 ¿Cuánto tiempo durmió anoche?
 ¿A qué hora se levantó esta mañana?
 ¿Quién le despertó? (en el caso de que sea por alguien)
 ¿Cuántos episodios ha tenido?
 El día anterior se recuperó (1/No, 2/Algunos, 3/Parcial, 4/Mucho de sueño)

ARRIBA
Figura 2. Fueya de l'axenda de sueñu que s'usa na nuestra Unidá del HUCA. Nella rexístrase tola actividá del día a lo llargo de dos selmanes (métodu suxetivu).

DERECHA
Figura 3. Exemplan d'actigrama obteníu colos datos sacaos del actígrafu. Atrópense tolos periodos d'actividá y de sueñu del día, a lo llargo de dos selmanes (métodu oxetivu).

Actograma:





Nel análisis del llíquidu cefalorraquídeo (que se consigue per aciu d'una punción llombar) pue determinase tamién el nivel d'hipocretina-1, que va tener un valor inferior a 110 pg/mL (picogramos per mililitru) nos casos de narcolepsia de triba 1, masque los pacientes con narcolepsia de triba 2 suelen tener valores normales (penriba los 110 pg/mL).

5) Polisomnografía nocherniega (PSG)

Ye una técnica del llaboratoriu del sueñu qu'axuda nel diagnósticu de narcolepsia. Consiste (Figures 4 y 5) nel rexistru continuu y supervisáu del estáu de vixilia y de sueñu espontaneu (non inducíu farmacológicamente), per aciu de variables tanto cardiorrespiratorias (fluxu respiratoriu oronasal, esfuerciu respiratoriu, saturación d'oxíxenu y de dióxidu de carbonu, frecuencia cardíaca, ronquíos, posición corporal y movimientos d'estremidaes) como neurofisiolóxicos (l'electroencefalograma, l'electrooculograma y l'electromiograma submentoniano).

Descarta otras patologías que tamién producen escesu de sueñu diurnu y aporta evidencia de cómo se durmió la nueche anterior a la realización del test de llatencies múltiples del sueñu (que vamos comentar de siguío a esti apartáu).

Evidencia la fragmentación del sueñu arriendes d'un posible aumentu de movimientos d'estremidaes.

Ye típico que nos pacientes con narcolepsia la llatencia del sueñu seya menor de 8 minutos y que pueda apaecer sueñu REM nos 15 primeros minutos de sueñu (denomao SOREM, les sigles n'inglés de Sleep Onset of Rapid Eye Movements o Aniciu del Sueñu en Fase REM).

6) Test de Llatencies Múltiples del Sueñu (TLMS)

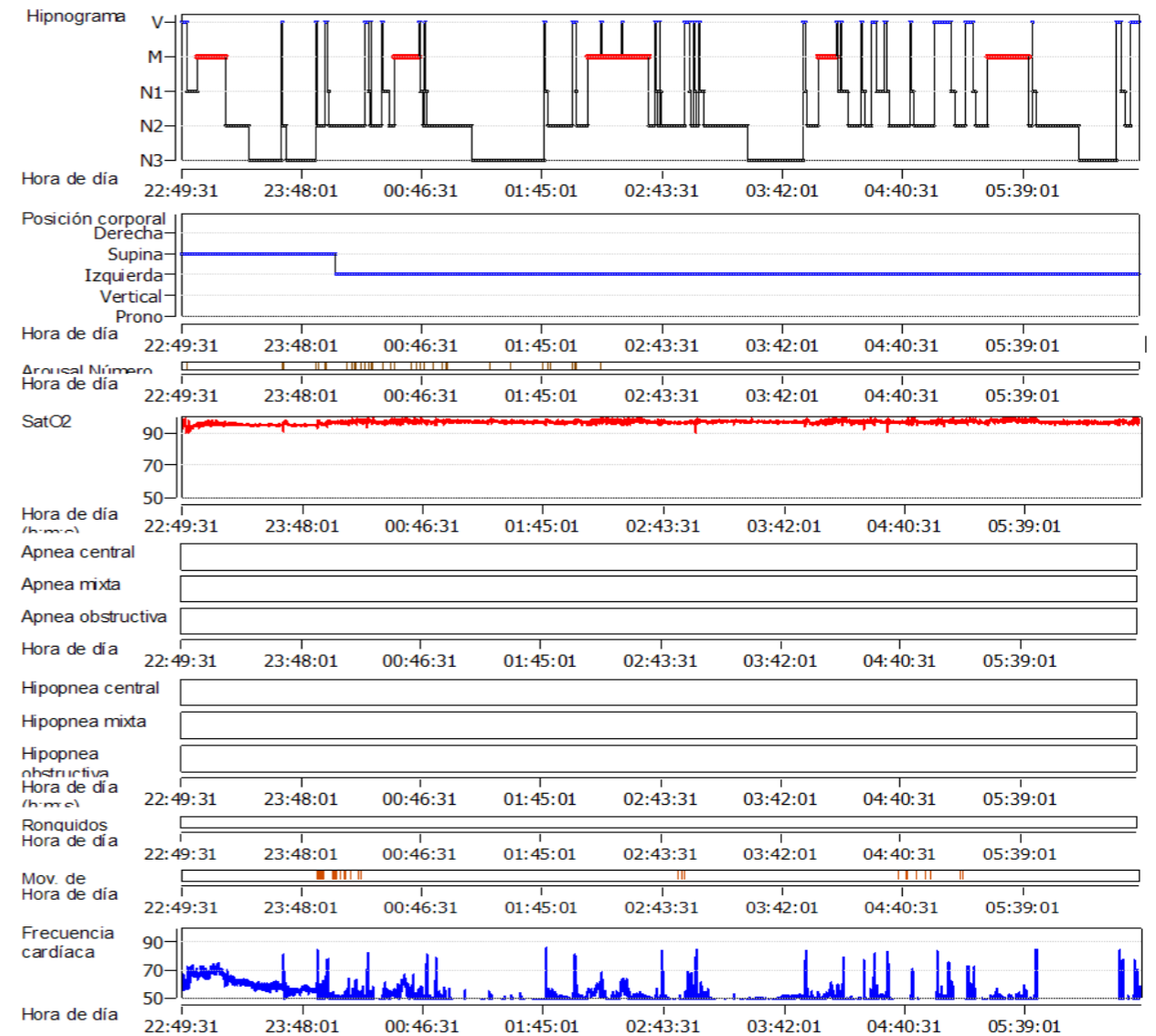
Constitúi la prueba de referencia principal pal diagnósticu de narcolepsia. Ye un métodu oxetivu pa medir l'escesu de sueñu diurnu. Consiste n'echar 5 pigazos de 20 minutos de duración caún, a intervalos de dos hores, empezan-

IZQUIERDA

Figura 4. Imaxe que corresponde a un total de 4 minutos del rexistru de sueñu de la polisomnografía (PSG), onde se puen ver toles variables incorporaes. D'arriba p'abaxo, n'azul l'electroencefalograma, en rosa'l tonu muscular nel cazu, en marrón los movimientos oculares, n'encarnao l'electrocardiograma, n'azul escuro los ronquíos, n'azul más claro'l fluxu aereu oronasal, en verde escuro l'esfuerciu respiratoriu del tórax y l'abdome, en naranxa los movimientos d'estremidaes, en buxo la frecuencia cardíaca y la saturación d'oxíxenu y en prieto la posición corporal. A lo último de la imaxe pue vese l'hipnograma, que ye una representación gráfica de les fases del sueñu a lo llargo la nueche. Rescampla n'encarnao la fase REM, onde podemos ver que'l primer bloque apaex mui al comienu, primero de los 15 minutos de sueñu, constituyendo ún de los criterios diagnósticos de la narcolepsia.

ABAXO

Figura 5. Resume del polisomnograma (PSG) de tola nueche nuna paciente narcoléptica. Vemos a lo primero l'hipnograma, depués la posición corporal (supinu, llateral drechu, llateral esquierdu o pronu), los microespertares, la saturación d'oxíxenu, les apnees y les hipopnees, los ronquíos, los movimientos de les estremidaes y la gráfica de la frecuencia cardíaca.



do a contar dos hores depués del despertar del paciente (Figura 6).

Pa considerar positiva esta prueba tien que se cumplir que la llatencia media de los 5 pigazos seya menor o igual a 8 minutos, y que lo menos en dos d'ellos apaeza sueño REM nos primeros 15 minutos de sueño (SOREM). Si amás d'esto'l paciente refier cataplexa o tien SOREM na PSG nocherniega de la nueche anterior, pue diagnosticase direutamente de narcolepsia de triba 1.

CRITERIOS DIAGNÓSTICOS

Con toles pruebas diagnóstiques comentaes nel apartáu anterior, la ICSD-3 afita los requisitos qu'han cumplise pal diagnósticu de dambes tribes de narcolepsia. Estos criterios puen consultase nes Figures 7 y 8.

ABAXO

Figura 6. Imaxe correspondiente al hipnograma xeneráu nel test de llatencies múltiples del sueño (TLMS) na mesma paciente narcoléptica de les dos figures anteriores, onde se puen ver los pigazos rexistraos a lo llargo la prueba. Nesti casu únícamente hai tres pigazos, nun hebo necesidá de facer los cinco reglamentarios porque como se pue observar apaeció sueño REM (n'encarnao) nos tres primeros, polo que yá cumple'l criteriu diagnósticu de la ICSD-3 pa narcolepsia y nun fizo falta seguir cola prueba hasta completar los cinco.

DERECHA ARRIBA

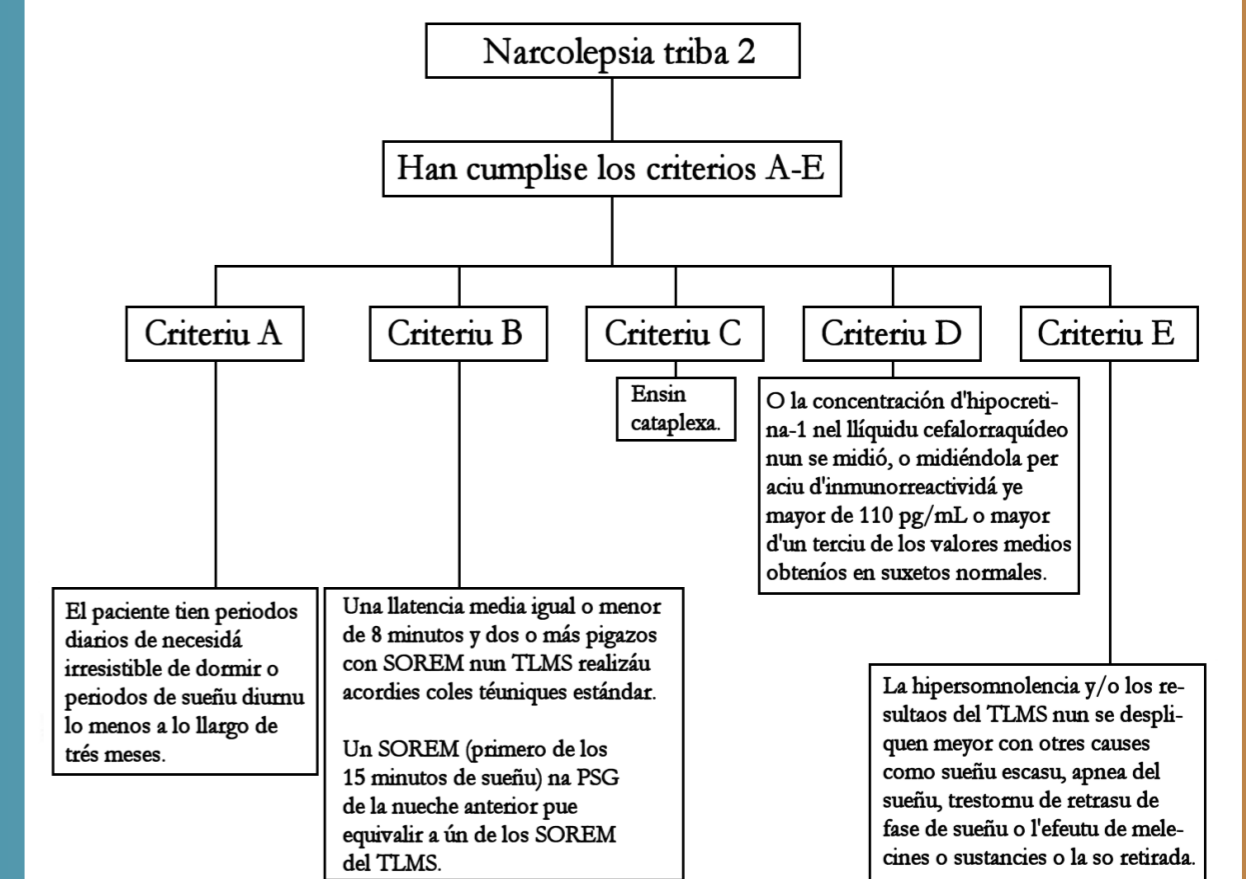
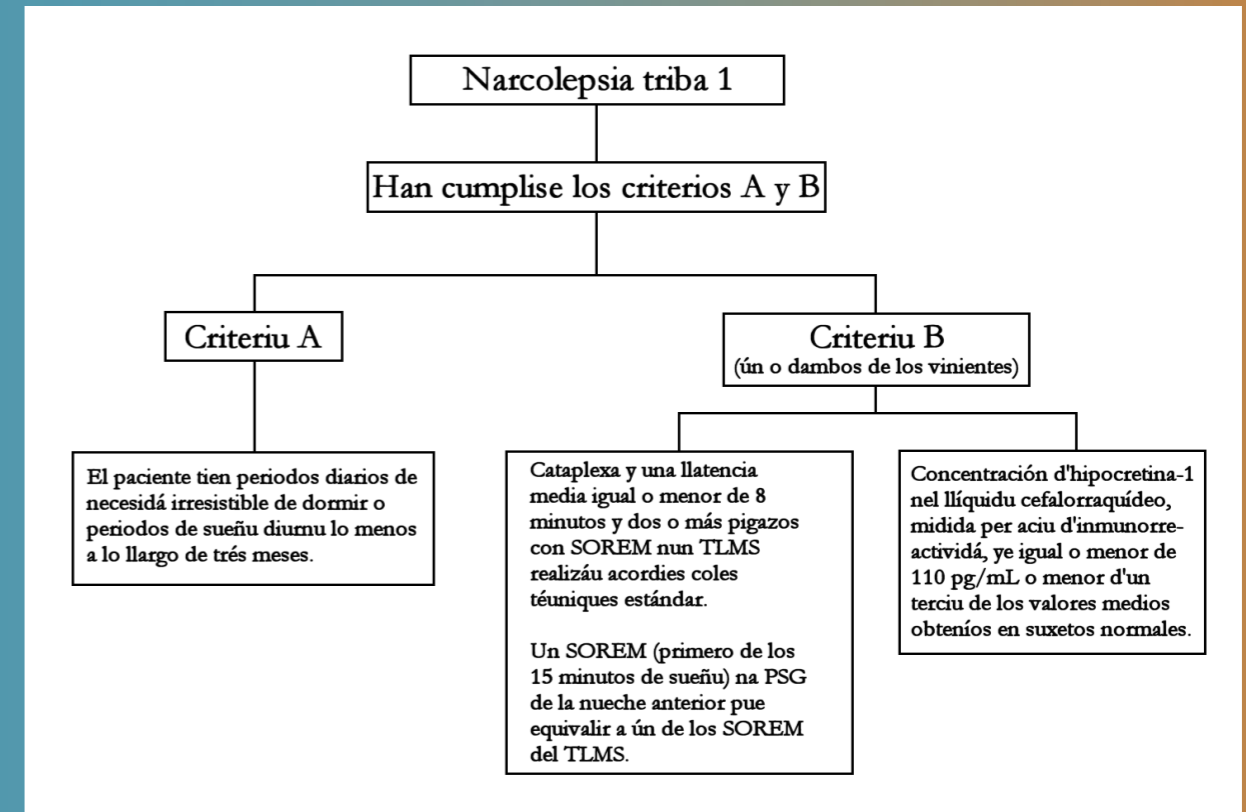
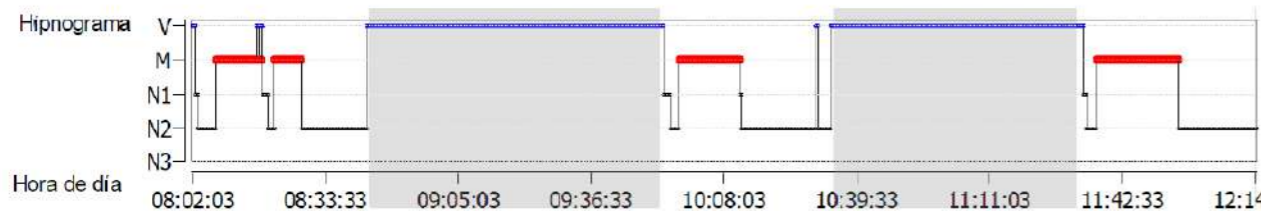
Figura 7. Criterios diagnósticos de la narcolepsia triba 1 (ICSD-3).

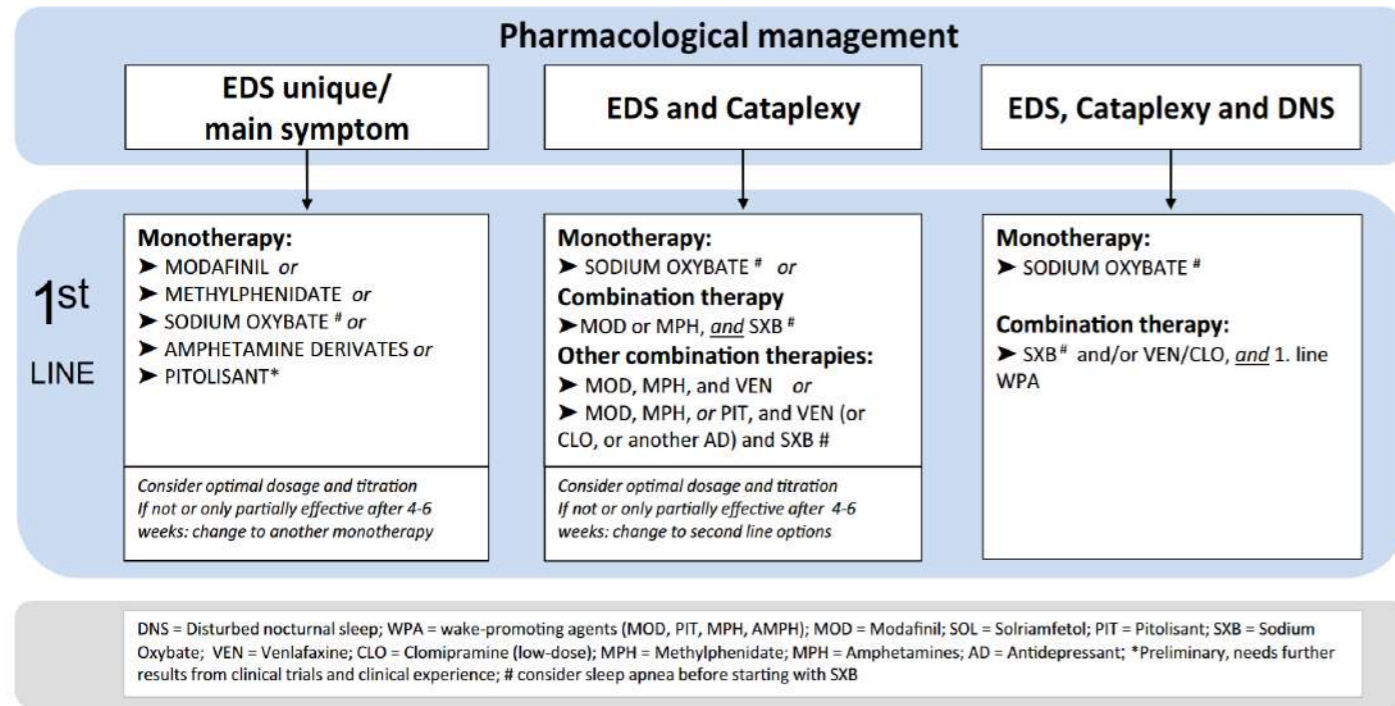
DERECHA ABAXO

Figura 8. Criterios diagnósticos de la narcolepsia triba 2 (ICSD-3).

Resume de los pigazos

	Pigazu 1	Pigazu 2	Pigazu 3	Pigazu 4	Pigazu 5	Media
Lluces mataes	08:02:19 AM	09:53:06 AM	11:32:25 AM	-	-	-
Luces prendies	08:43:52 AM	10:33:39 AM	12:13:58 PM	-	-	-
Tiempu na cama	41,5	40,5	41,5	-	-	41,2
Tiempu del sueño	39,5	39,0	40,4	-	-	39,6
Eficiencia del sueño	95,1 %	96,2 %	97,3 %	-	-	96,2 %
Aniciu del sueño	08:03:02 AM	09:54:02 AM	11:33:32 AM	-	-	-
Llatencia del sueño	0,7	0,9	1,1	-	-	0,9
Alniciu de REM	08:07:32 AM	09:57:32 AM	11:36:32 AM	-	-	-
Llatencia de REM	4,5	3,5	3,0	-	-	3,7





TRATAMIENTO

La narcolepsia ye una malura que, hasta agora, nun dispón de cura, polo que les aiciones del médicu han centrarse, de momentu, nun remanamientu a plazu llargu del control de los síntomas.

Pa ello, disponemos de midies non farmacolóxiques y de midies farmacolóxiques.

1) Tratamientu non farmacolóxicu

- Caltener una hixene del sueñu correuta: afitar vezes y rutines afayadices pa favorecer el ritmu circadianu del sueñu.
- Favorecer la vixilia: evitar situaciones propenses a provocar sueñu o adormilamientu.
- Actividá física: menguar el riesgu d'obesidá.
- Programar pigazos curtios: 3 o 4 al día, d'unos 10-20 minutos de duración caún.

ARRIBA

Figura 9. Proceder terapéuticu de la narcolepsia infanto-xuvenil recomendáu poles Guías Europees de 2021, vixentes anguaño [Fonte: European Guideline and Expert Statements on the Management of Narcolepsy in Adults and Children. J Sleep Res. 30:e13387].

- Educación de los miembros de la familia: depende-yos les situaciones que provoquen cataplexa ya informalos de los síntomas de la enfermedá.
- Información a profesores y a otros profesionales médicos que nun pertenezan a la estaya del sueñu.
- Soporte de Salú Mental: en dellos casos los pacientes puen beneficiase de l'atención psicolóxica o psiquiátrica pa xestionar les posibles consecuencies psicolóxiques y sico-sociales de la enfermedá.

2) Tratamientu farmacolóxicu

Dientro d'esti apartáu cuntamos con un garapiellu de posibilidaes que nos permite personalizar el tratamientu individual del paciente acordies coles particularidaes que presenta.

A mou de resume (n'inglés, ensin traducir), na Figura 9 espéyase'l cuadru de tratamientu de la narcolepsia infanto-xuvenil recomendáu poles Guías Europees, teniendo en cuenta les manifestaciones clínicas individuales del paciente. Darréu desplíquense tolos grupos de fármacos de los que disponemos.

a) Estimulantes del sistema nerviosu central: anfetamines.

- Metilfenidatu
- Dextroanfetamina
- Otros derivaos

Son útiles pal escesu de sueñu diurnu pero non pa la cataplexa. Como efeutos secundarios, pue apaecer riesgu cardiacu, anorexa, insomniu y potencial d'abusu.

b) Promotores de la vixilia:

- Modafinilu
- Armodafinilu

Tienen utilidá nel escesu de sueñu diurnu, pero ponse en dubia la so validez pa tratar la cataplexa. Como efeutos secundarios, puen producir cefalea, arcaes, insomniu y erupciones graves del pelleyu.

c) Promotor del sueñu nocherniegu: oxibatu sódicu.

Tanto na so modalidá pura como na alternativa baxa en sodiu (pa xente hipertenso, por casu). Tien utilidá tamién nel escesu de sueñu diurnu, amás de servir contra la cataplexa. Ta aprobáu l'usu en neños mayores de 7 años. Como efeu-

tos secundarios pue xurdir confusión, ansiedá, amorios, arcaes y sonambulismu.

d) Antidepresivos:

- Tricíclicos: clomipramina, imipramina, protriptilina. Aprobáu'l so usu en neños de más de 10 años.
- Inhibidores seletivos de la recaptación de serotonina: fluoxetina, sertralina, citalopram.
- Inhibidores de la recaptación de serotonina/noradrenalina: venlafaxina.

Nun son útiles pa vencer l'escesu de sueñu diurnu, pero sí pa tratar la cataplexa (y siempre combinaos con otros tratamientos, nunca por ellos solos). Los efeutos secundarios más comunes son arcaes, perda de pesu, insomniu y temblíos.

e) Antagonistes histamínicos H3: pitolisant.

Ye un fármacu nuevu que s'aprobó va poco (marzu de 2023) pal tratamientu de la narcolepsia en neños mayores de 6 años. Actúa contra l'escesu de sueñu diurnu y contra la cataplexa. Los efeutos secundarios que pue producir son insomniu, cefalea, arcaes, ansiedá y amorios. Paez un fármacu prometedor por cuenta de que trata dambos de los síntomas principales y tien pocos efeutos secundarios.

f) Otros tratamientos.

- Solriamfetol
- Agonistes d'hipocretina
- Estratexa inmunomoduladora
- Tresplante de célules
- Reemplazu de xenes

Trátase de soluciones inda non estandarizaes pero que tán investigándose anguaño pa poder amestales nun plazu mediu-llargu a la llista de posibilidaes terapéutiques de les que se dispón hasta agora.

COMORBILIDAD Y MORTALIDAD

Cola narcolepsia puen apaecer, a la xunta, otre malures qu'aumenten la gravedá de los síntomas, como'l síndrome d'apnees del sueño, les velees, el sonambulismu, el trestornu de conducta del sueño REM, el síndrome de piernas bulliciegues y los movimientos periódicos d'estremidaes. Yá se comentó anteriormente nesti artículu que la obesidá tamién ta presente en más d'un 50 % de los casos.

Hai estudios que demostraron que los pacientes narcolépticos tienen un riesgo de mortalidá 1,5 veces mayor que la población xeneral, masque nun s'identificó hasta agora la causa concreta d'ello; toles investigaciones feches hasta agora empobinen a que seya por cuenta de les enfermedaes comórbides más que pola propia narcolepsia, pero nesti campu inda falta desenvolver más l'estudiu.

CONCLUSIONES

La narcolepsia ye una enfermedá que presenta un diagnósticu tardíu (retrasu mediu de 11,8 años), y que na población infantil y xuvenil amuesa unos síntomas dalgo distintos a los adultos, como la «facies catapléctica» y el fechu de que l'escesu de sueño diurnu non siempre ye obviu.

La repercusión sicosocial en neños y mogaes ye más fonda que nos adultos y hai que lo tener siempre presente a lo llargo la evolución de la enfermedá, procurando atayar lo primero posible les sos consecuencias.

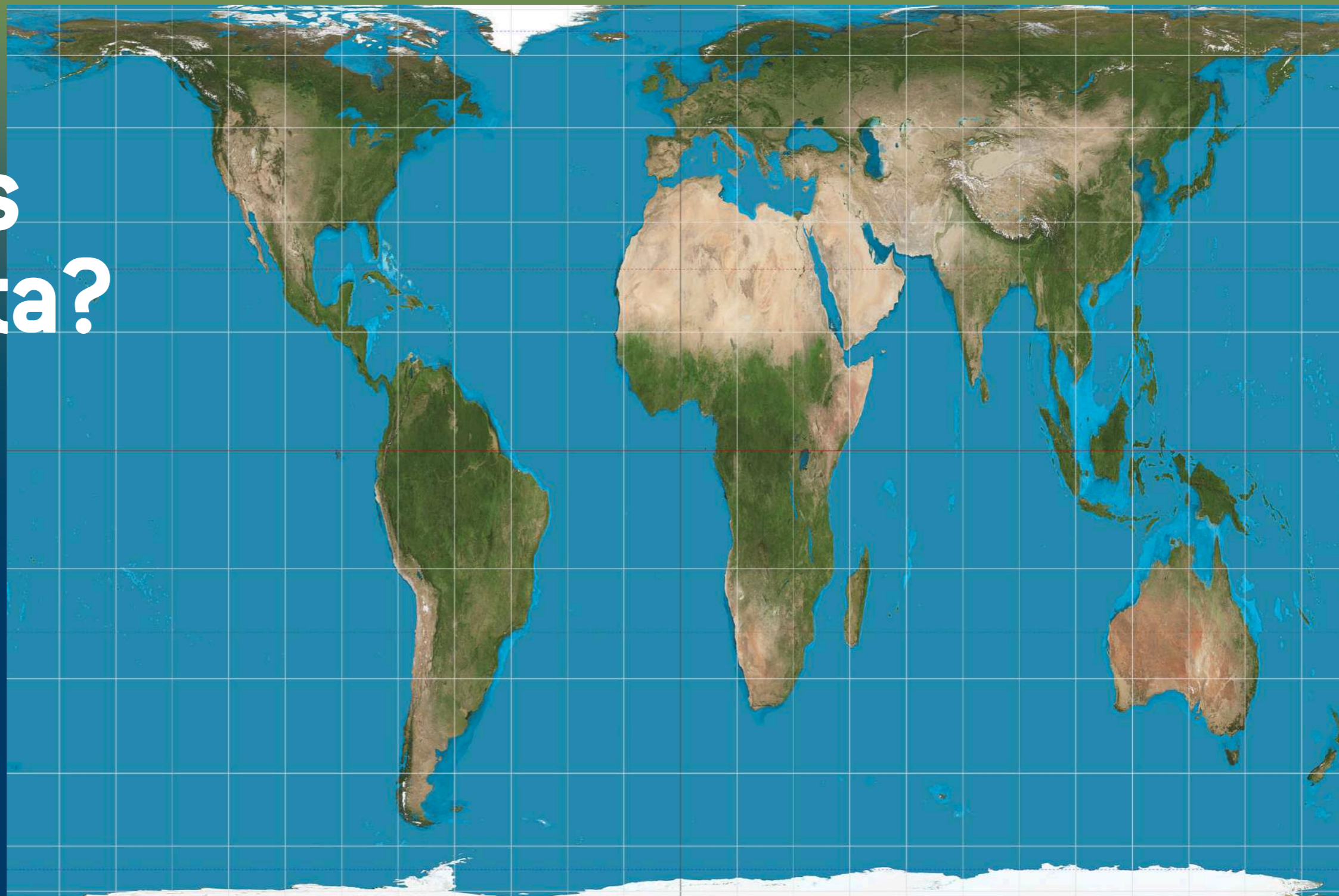
Tenemos nueves posibilidaes terapéutiques pa tratar los pacientes nesta etapa vital, como por casu'l pitolisant, aprobáu recién a partir de los 6 años d'edá.

Ye precisu siguir faciendo más estudios epidemiolóxicos, diagnósticos y terapéuticos na población infantil y xuvenil.

Referencies bibliográfiques

- Barateau, L., Dauvilliers, Y. (2019). Recent Advances in Treatment for Narcolepsy. *Ther Adv Neurol Disord* 1, pp. 1-12.
- Bassetti, C.L.A. *et al.* (2021). European Guideline and Expert Statements on the Management of Narcolepsy in Adults and Children. *J Sleep Res* 30. <https://doi.org/10.1111/ene.14888>
- Blackwell, J. E., Kingshott, R. N., Weighall, A., Elphick, H. E. & Nash, H. (2022). Paediatric Narcolepsy: a Review of Diagnosis and Management. *Arch Dis Child* 107, pp. 7-11.
- Blattner, M., Maski, K. (2023). Narcolepsy and Idiopathic Hypersomnia. *Sleep Med Clin* 18, pp. 183-199.
- Drake, C., Nickel, C., Burduvali, E., Roth, T., Jefferson, C. & Badia, P. (2003). The Pediatric Daytime Sleepiness Scale (PDSS): Sleep Habits and School Outcomes in Middle-school Children. *Sleep* 26, p. 4.
- Franceschini, C., Pizza, F., Antelmi, E., Folli, M. C., Plazzi, G. (2020). Narcolepsy Treatment: Pharmacological and Behavioral Strategies in Adults and Children. *Sleep Breath* 24, pp. 615-627.
- I-Hang, C., Wei-Chih, C., Yu-Shu, H., Chih-Huan, W. (2022). Pediatric Narcolepsy - A Practical Review. *Children* 9, p. 974.
- Merino-Andréu, M., Martínez-Bermejo, A. (2009). Narcolepsia con y sin cataplejia: una enfermedad rara, limitante e infradiagnosticada. *An Pediatr (Barc)* 71(6), pp. 524-534.
- Moresco, M., Pizza, F., Antelmi, E. & Plazzi, G. (2018). Sodium Oxybate Treatment in Pediatric Type 1 Narcolepsy. *Current Drug Metabolism* 19. DOI: [10.2174/1389200219666180305153134](https://doi.org/10.2174/1389200219666180305153134)
- Morse, A. M. (2019). Narcolepsy in Children and Adults: A Guide to Improved Recognition, Diagnosis and Management. *Med. Sci.* 7, p. 106.
- Robinson-Shelton, A. (2023). Sleep Disorders in Childhood. *Continuum (Minneap Minn)* 29(4, Sleep Neurology). DOI: [10.1212/CON.0000000000001285](https://doi.org/10.1212/CON.0000000000001285)
- Spruyt, K. (2020). Narcolepsy Presentation in Diverse Populations: an Update. *Curr Sleep Medicine Rep* 6, pp. 239-250.

¿Ú tán les coraes del planeta?



Por **José Ramón Obeso**

Cadernalgu d'Ecología

Departamentu de Bioloxía d'Organismos y Sistemes

Institutu Mestu d'Investigación en Biodiversidá (IMIB), Universidá d'Uviéu

Conseyu Superior d'Investigaciones Científiques y Principáu d'Asturies

Distribución del agua nel planeta Tierra (mapa de Daniel R. Strebe, 15 de xunetu del 2011).

LA IMPORTANCIA DEL OXÍGENO

Les viesques tropicales, y cualesquier viesca en xeneral, suelen considerase los «pulmones del planeta» por mor de la so capacidá p'absorber dióxidu de carbonu y producir oxíxenu. Sicasí, esta interpretación que ta tan arraigonada socialmente ye en realidá un falsu mitu que poco tien que ver col conocimientu científicu del que disponemos anguaño.

La cantidá d'oxíxenu disponible na nuesa atmósfera ye'l resultáu d'una historia mui llarga nel planeta. L'oxíxenu ye l'elementu más abondosu de la corteza terrestre, yá que representa casi la metá (46 %) d'ella. Amás, si consideramos tola masa del planeta, sedría'l segundu elementu que más pesu tien (30 % del total), namás per detrás del fierro (32 % del total).

Sicasí, na so forma llibre, oxíxenu molecular O₂, na atmósfera primitiva del nuesu planeta taba mui poco disponible. Nos primeros 2.000 millones d'años (Ma) de la historia del planeta, la so concentración na atmósfera representaba namás el 0,001 %. Esto desplicase porque l'oxíxenu ye una especie química mui reactiva y tiende a oxidar a otros munchos elementos. Asina, tenemos cantidaes inmensas d'agua (óxidu d'hidróxenu), arena (dióxidu de siliciu) y óxidos de fierro, ente dellos otros. Sicasí, anguaño, l'oxíxenu representa'l 21 % de la composición atmosférica. Entós, ¿qué procesu camudó esta situación y llevó oxíxenu na so forma llibre, O₂, dende'l 0,001 % al 21 % de la composición atmosférica d'anguaño?

La historia de la medra de la concentración d'oxíxenu na atmósfera tien recibíu muncha atención interdisciplinar de recién, pero ello nun quita pa que'l ruempcabeces entá nun se resolviere dafechu. De recién, la información bioxeoquímica atribúi a les primeres plantes

Les viesques tropicales, y cualesquier viesca en xeneral, suelen considerase los «pulmones del planeta» pola so capacidá p'absorber dióxidu de carbonu y producir oxíxenu. Sicasí, esta interpretación ye en realidá un falsu mitu que poco tien que ver col conocimientu científicu del que disponemos anguaño. De recién, la información bioxeoquímica atribúi a les primeres plantes terrestres dende va 470 millones d'años (Ma) el gran procesu d'oxidación atmosférica hasta llegar a los niveles actuales

terrestres dende va 470 Ma el gran procesu d'oxidación atmosférica hasta llegar a los niveles actuales (Lenton *et al.*, 2016).

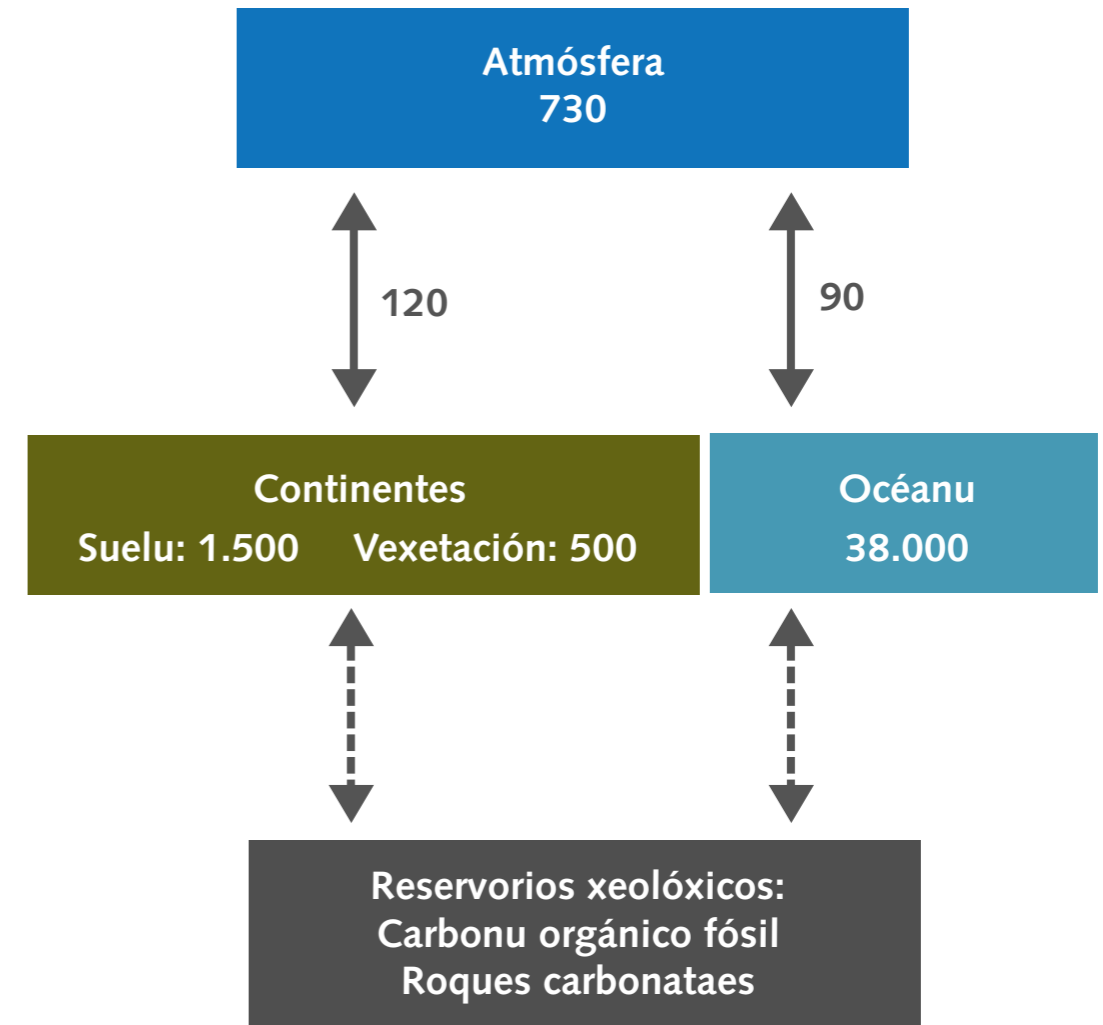
EL CICLU DEL OXÍGENO TA VENCEYÁU AL CICLU DEL CARBONU

El ciclu global del oxíxenu ta venceyáu al del carbonu, como amuesa la ecuación básica de producción-consumu de biomasa (1), lo qu'indica una correlación negativa ente dióxidu de carbonu y oxíxenu. La producción de biomasa más importante del planeta a nivel cuantitativu (<98 %) surge de la fotosíntesis oxixénica (1) que ye la que faen plantes, algues y munches bacteries. L'oxíxenu produciu por esti procesu utilízase de manera cíclica pa oxidar la biomasa produciu, asina como la necromasa (carbonu del suelu y materia orgánica muerta), al traviés de procesos de respiración y/o descomposición.



El ciclu natural del carbonu (Figura 1) ta equilibráu práuticamente. Depués de les roques carbonataes y el carbonu fósil que procede de materia orgánica, l'océanu ye la mayor reserva de carbonu, lo más d'ello na so forma inorgánica, dentro del equilibriu carbónicu-carbonatu.

Nos continentes, la mayor parte del carbonu orgánicu alcuéntrase nel suelu. Cada añu la vexetación de los continentes incorpora dende



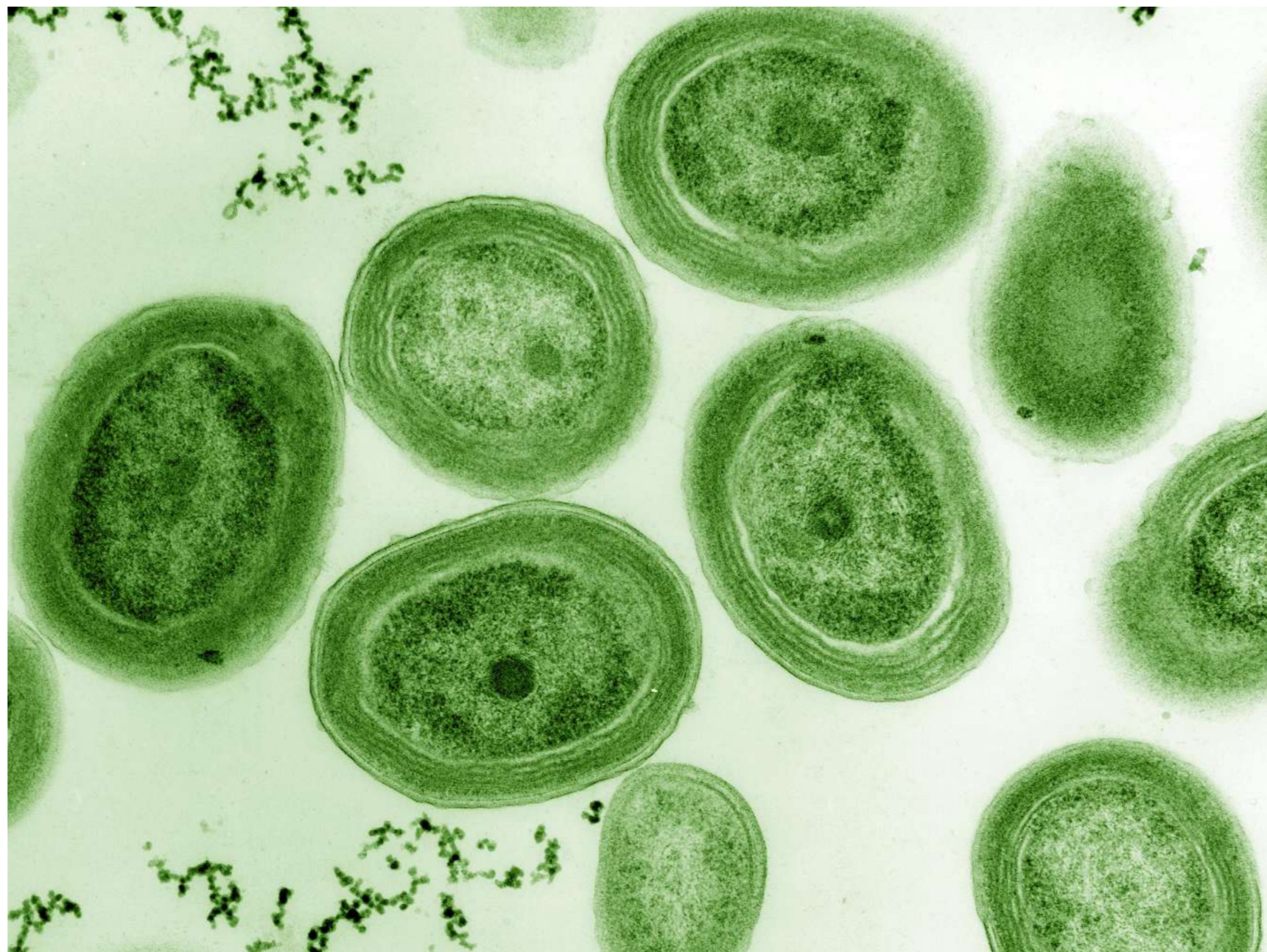
ARRIBA

Figura 1. El ciclu natural global del carbonu simplificáu: tomáu de Prentice *et al.* (2001). Les cantidaes de los reservorios (caxes) amuénsense en petagramos [Pg = 10¹⁵ g] y de los fluxos añales de carbonu (fleches) en Pg añu⁻¹. Nun s'inclúin les alteriaciones atrópiques del ciclu.

l'atmósfera a la biomasa de los ecosistemas 120 petagramos (Pg) de carbonu, pero una cantidá asemeyada devuélvese a l'atmósfera por procesos d'oxidación de la materia orgánico: 60 Pg (55 %) correspuenden a la respiración de la propia vexetación (respiración autótrofa), 55 Pg (45 %) a la respiración heterótrofa (respiración d'organismos que consumen materia orgánico, yá seya vivo o muerto: animales, fungos, microorganismos) y 4 Pg por procesos de combustión natural. De manera asemeyada, nos océanos, los productores primarios (cianobacteries fotosintétiques y algues) amiesten 103 Pg C añu⁻¹ a la materia orgánico, pero la producción neta ye de 45 Pg C añu⁻¹, yá que la respiración autótrofa consume 58 Pg C añu⁻¹ (56 %) y la hererótrofa 34 Pg C añu⁻¹ (34 %).

Considerando la proporción d'oxíxenu que contién el dióxidu de carbonu, los organismos que faen fotosíntesis oxixénica nel planeta producen, añalmente, unos 600 Pg d'O₂. Sicasí, los procesos d'oxidación de la materia orgánico (respiración, descomposición, combustión natural) consumen aproximadamente la mesma cantidá.

Al suponer l'oxíxenu que contién l'atmósfera, más o menos, $1,2 \times 10^{21}$ g, tolos organismos fotosintéticos del planeta tardaríen más de 2.000 años en producir esa cantidá d'oxíxenu. Polo tanto, tenemos un ciclu más o menos axustáu (nun ye exautamente equilibráu porque los ecosistemas puen almacenar C o perdelo por combustiones naturales): aproximadamente la mesma cantidá de carbonu qu'ingresa nos ecosistemas terrestres dende l'atmósfera pola fotosíntesis de los organismos autótrofos únviase otra vez a l'atmósfera pola respiración de los organismos del ecosistema que producen dióxidu de carbonu como residuu. Asina, la mesma cantidá d'oxíxenu que se produz como residuu del procesu fotosintéticu consúme-la la respiración de los organismos del ecosistema,



En conclusión, nin la vexetación terrestre actual nin los organismos fotosintéticos marinos son los responsables de la producción del oxíxenu que respiramos.

ARRIBA

Figura 2. La cianobacteria Prochlorococcus.

qu'oxiden la materia orgánico pa producir enerxía. En conclusión, nin la vexetación terrestre actual nin los organismos fotosintéticos marinos son los responsables de la producción del oxíxenu que respiramos.

¿Y Ú TA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA NEL PLANETA?

Efectivamente, nos sistemas terrestres les viesques tropicales son responsables del 35 % de la producción de biomasa, magar qu'ocupen namás el 12 % de la superficie terrestre. Síguenlos de cerca les sabanes y praderes tropicales que, magar de ser vexetación yerbáceo baxo, suponen el 24 % de la producción global de los continentes (Mooney, Roy & Saugier, 2001).

Nos océanos, el fitoplacton ye responsable del 95 % de la producción primaria total. Los grupos más importantes son: diatomees n'agua rico en nutrientes, dinoflaxelaos, coccolitofóridos en zones con concentraciones medies de nutrientes y cianobacteries (*Prochlorococcus*, *Synechococcus*) n'agua probe en

nutrientes (oligótrofa).

En concreto, considérase a *Prochlorococcus* (Figura 2) responsable d'ente'l 20 y el 40 % de tola producción del océanu. Esti xéneru de cianobacteries¹ ye de tamañu pequeñu (0,6 micres),

1. Nota editorial: Más información sobre les Cianobacteries en *Ciencias* 8, pp. 4-19.

habita zonas cálides y probes en nutrientes (agua tropical y subtropical), ye l'organismu fotosintéticu más abundante del planeta y l'organismu más importante en términos de producción de materia orgánico. Tienen una diversidá xenética y fisiolóxica considerable. Anque de manera individual, cada célula tien un xenoma relativamente simple, coleutivamente la población global contién un xenoma que-y permite tener éxitu nuna gran variedá de condiciones ambientales: intensidá de lluz, temperatura y nutrientes (Biller *et al.*, 2015). En resume, les rexones tropicales nos continentes y les cianobacteries nel océanu son los verdaderos responsables de la mayor parte de la producción de biomasa nel planeta.

LA LLARGA HISTORIA DEL OXÍXENU NA ATMÓSFERA

Si la producción d'oxíxenu polos ecosistemas ta más o menos equilibrada col so consumu, pa que s'acumule oxíxenu na atmósfera la tasa d'incorporación de C a los ecosistemas tien de superar la tasa de descomposición qu'unvia CO₂ a l'atmósfera, lo que conduz a l'acumulación de materia orgánico resistente a la biodegradación nos ecosistemas.

La historia de l'acumulación d'oxíxenu na atmósfera a gran escala entamó col desarrollu evolutivu, fai unos 2.500 Ma, d'un mecanismu nuevu de xeneración de materia orgánico por microorganismos que nun yeren quien a facer la fotosíntesis oxixénica: les cianobacteries primitives o antecesores de les actuales del grupu de les *Oxyphotobacteria*. El so anovamientu verdaderu consistió nel desarrollu d'un sistema de centros de reaición fotoquímicos (posiblemente alquiríos per tresferencia xenética horizontal dende otra bacteria fotosintética non oxixénica)

qu'empleguen la enerxía lluminica xenerao pol sol pa producir la fotólisis del agua y lliberar O₂ como residuu del procesu fotosintéticu. La so capacidá pa utilizar agua, un recursu particularmente abundante nel planeta, como donante d'electrones pa la fotosíntesis impulsó una producción primaria esplosiva frente a les restricciones impuestes pola disponibilidá d'otres fontes de donantes qu'otros fotoautótrofos taben emplegando, como H₂S, H₂, Fe²⁺. Estes bacteries con fotosíntesis non oxixénica tán circunscrites a ambientes anaerobios (sedimentos, pantanos, zones d'agua termal, llagos con sulfhídricu) y la so importancia cuantitativa anguaño ye poco relevante en comparanza cola fotosíntesis oxixénica (<2 %).

L'oxíxenu que procede d'esta actividá fotosintética atopóse darréu pol fierru reducíu (ion ferrosu, Fe²⁺), que yera predominante nel océanu. El resultáu foi la producción de cantidaes inmensas d'óxidu de fierru que se depositaron nos sedimentos oceánicos formando les denominaes «formaciones de fierru bandiao» (*banded iron formations*), que se produxeron hasta va unos 2.000 Ma. Esto denominóse «eventu de gran oxidación» (*great oxydation event*).

La verdadera acumulación d'oxíxenu na atmósfera prodúxose va 470 Ma cola espansión de la vexetación terrestre nel planeta (Lenton *et al.*, 2016). Primero, cola espansión de plantes non vasculares (musgos y hepátiques), siguida pola espansión de plantes vasculares, en particular los primeros árboles dende va 385 Ma.

La espansión de la vexetación terrestre asocióse temporalmente con una reducción de la concentración de CO₂ na atmósfera y una acumulación d'O₂. Esti cambéu na composición atmosférica namás se pue producir si la tasa d'incorporación de C a la vexetación su-

La verdadera acumulación d'oxíxenu na atmósfera prodúxose va 470 Ma cola espansión de la vexetación terrestre nel planeta (Lenton et al., 2016). Primero, cola espansión de plantes non vasculares (musgos y hepátiques), siguida pola espansión de plantes vasculares, en particular los primeros árboles dende va 385 Ma

pera la tasa de descomposición qu'unvia CO₂ a l'atmósfera, lo que trai con ello l'acumulación de materia orgánico resistente a la biodegradación nos ecosistemas. Efeutivamente, esti periodu d'aumentu d'oxíxenu atmosféricu coincide col enterramientu de cantidaes inmensas de carbonu que dio llugar a los depósitos de carbón, sobre manera nel Devónicu y el Carboníferu (l'atmósfera algama'l 23-26 % d'oxíxenu al final d'esti periodu).

Dende entós, les oscilaciones de la pO₂ (presión parcial d'oxíxenu) tienen una historia xeolóxica llarga na que s'entemecen les influencies mutues, de retrocontrol, ente la pCO₂, el pO₂, la vexetación terrestre, la combustión natural y el clima, asina como les interacciones y retrocontrol de los ciclos bioxeoquímicos globales del carbonu, zufre, fósforu y oxíxenu (Berner, 1999; Alcott *et al.*, 2019). Si la pO₂ medra muncho, prodúcense quemes de vexetación a escala global que consumen oxíxenu menguando la so concentración na atmósfera. La medra del pO₂ trai con ella la baxada del CO₂ cola consecuente medra de temperatura. Dalgunes hipótesis asocian estos cambeos con dalgunes de les grandes estinciones que se produxeron a lo llargo de la historia de la vida. Asina sedría'l casu de la gran estinción del final del Paleozoico, que s'asocia con un enfriamientu (Montañez & Poulsen, 2013).

¿QUIÉN ASFIXA LES CORAES DEL PLANETA?

La cantidá d'oxíxenu de l'atmósfera ye tan alta con rrellación al oxíxenu que se moviliza nel so ciclu global, que difícilmente podemos camudalo de manera significativa. Les actividaes antrópiques alteriaron sensiblemente'l ciclu de carbonu afeutando a la concentración de CO₂ na atmósfera con incidencia notable sobre'l clima global. Sicasí, la concentración d'esti gas ye

L'acumulación d'oxíxenu na atmósfera entamó hai unos 2.500 millones d'años coles cianobacteries primitives o antecesores de les actuales Oxyphotobacteria, pero la verdadera acumulación prodúxose hai 470 Ma cola espansión terrestre de plantes non vasculares a lo primero y vasculares (sobremanera los árboles) después.

de 420 partes por millón (ppm), mientras que la d'oxíxenu ye 210.000 ppm. Estímase que les actividaes antrópiques que consumen oxíxenu atmosféricu, como l'usu de combustibles fósiles, les quemes, la producción añal y les actividaes agrícolas mermen cada añu en 4 ppm la cantidá d'oxíxenu atmosféricu (Keeling & Manning, 2014; Huang *et al.*, 2021). A esti ritmu, tardaríamos delles decenes de miles d'años n'acabar les reserves d'oxíxenu atmosféricu.

En conclusión, los «pulmones del planeta» foron les primeres plantes terrestres, porque'l ciclu bioxeoquímicu global del oxíxenu actual ta más o menos balanciáu en cuanto a producción y consumu polos ecosistemas. Amás, la cantidá d'oxíxenu atmosféricu disponible pa la respiración de los ecosistemas ye tan alto que'l so consumu, por mor de les actividaes antrópiques, nun afeuta sensiblemente al ciclu global del oxíxenu, anque sí lo fai de manera significativa al ciclu de carbonu.

Referencies bibliográfiques

- Alcott, L. J., Mills, B. J. W. & Poulton, S. W. (2019). Stepwise Earth oxygenation is an inherent property of global biogeochemical cycling. *Science* 366, pp. 1333–137.
- Berner, R. A. (1999). Atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96, pp. 10955–10957.
- Biller, S. J., Berube, P. M., Lindell, D. & Chisholm, S. W. (2015). Prochlorococcus: the structure and function of collective diversity. *Nature Reviews Microbiology* 13, pp. 13–27.
- Huang, J., Liu, X., He, Y., Shen, S., Hou, Z., Li, S., Li, C., Yao, L. & Huang, J. (2021). The oxygen cycle and a habitable Earth. *Science China. Earth Sciences*.
- Keeling, R. F. & Manning, A. C. (2014). Studies of recent changes in atmospheric O₂ content. En Holland, H. D. & Turekian, K. K. (Eds.). *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, pp. 385–404. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00420-4. [Segunda edición].
- Montañez, I. P. & Poulsen, C. J. (2013). The Late Paleozoic Ice Age: An evolving paradigm. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41, pp. 629–656.
- Lenton, T. M., Dahl, T. W., Daines, S. J., Mills, B. J. W., Ozaki, K., Saltzman, M. R. & Porada, P. (2016). Earliest land plants created modern levels of atmospheric oxygen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113(35), pp. 9704–9709. doi: 10.1073/pnas.1604787113.
- Mooney, H. A., Roy, J. & Saugier, B. (2001). *Terrestrial Global productivity*. Elsevier: Academic Press.
- Prentice, I. C. *et al.* (2001) The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. En Houghton, J. T. *et al.* (Eds.). *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, pp. 185–225. Cambridge: Cambridge University Press.



El llixiviáu d'arsénicu nes escombreres de les mines de mercuriu en Llena



Instalaciones de La Soterraña enantes y nel procesu de restauración del terrén d'anguaño

Por **Ángeles Fernández González**

Caderalga de Cristalografía y Mineraloxía
Departamentu de Xeoloxía
Universidá d'Uviéu

Begoña Fernández Pérez

Profesora Titular
Departamentu Ciencia de los Materiales ya Inxeniería Metalúrxica
Universidá d'Uviéu

Antonio Marqués Sierra

Doctor pola Universidá d'Uviéu
Laboratoriu d'Utilización In Situ de Recursos (ISRULAB)
Institutu de Ciencies y Teunoloxíes Espaciales (ICTEA)

Noemí Guallar Machín

Graduada en Xeoloxía y Máster en Recursos Xeolóxicos
ya Inxeniería Xeolóxica pola Universidá d'Uviéu

Por bien de siglos la minería foi un sector clave de la economía y una seña d'identidá d'Asturies. La trascendencia qu'algamaron les mines de carbón na segunda metá del sieglu XX, que convirtieron al territoriu na mayor área minera d'España, nun pue escurecer la importancia que tamién tuvo equí la minería de recursos metálicos. Magar que na actualidá, a esceición del oru, estes esplotaciones tean inactivas esperando por condiciones más favorables, na rexón hubo mines de materiales estremaos: manganesu, fierro, cobre, plomu, cinc, cobaltu, níquel, wolframiu, estañu, molibdenu, antimoniú, arsénicu y, sobre manera, mercuriu. Asturies¹ foi'l segundu productor d'España de mercuriu, depués d'Almadén, y llegó a producir el 5 % del mercuriu a nivel mundial a finales de los años 60 del sieglu pasáu. Sicasí, el preciu d'esti metal cayó tanto que toles esplotaciones foron zarrando adulces y, la última mina, La Soterraña, cesó la so actividá en 1974.

Asturies foi'l segundu productor d'España de mercuriu y llegó a producir el 5 % a nivel mundial a finales de los años 60 del sieglu pasáu.

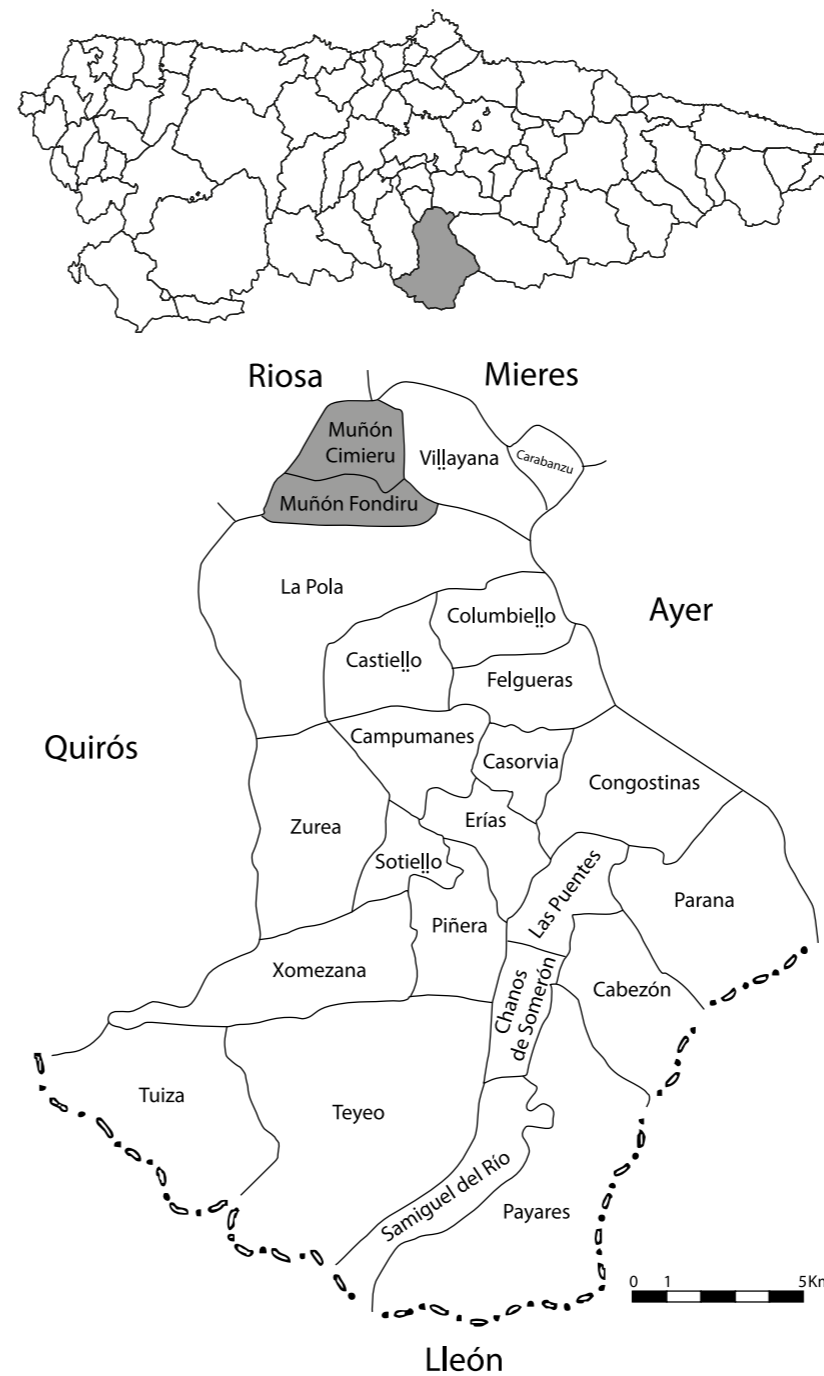
Como consecuencia d'esta intensa actividá minera del pasáu, los restos de los llabores antiguos, como bocamines, escombreres, piles d'atropu o instalaciones abandonaes, son mui abundantes na rexón. No que cinca a les esplotaciones de mercuriu antigües, la mayoría entren na categoría de «mines güérfanes», ye dicir, anque potencialmente puen tener un gran impautu ambiental, inclusive dañar la salú o la

1. Nota editorial: más información sobre la minería metálica n'Asturies en *Ciencias* 14, pp. 38-61.

seguridá de les persones, nun existen responsables con capacidá bastante como pa llevar alantre un remediú. De fechu, dalgunes d'elles como La Peña y El Tarronal (dambes en Mieres), o La Soterraña (en Llena) tán reconocíes como una fonte importante de contaminación llocal. La mina de La Soterraña ye un focu de preocupación pa l'Alministración y pa la comunidá científica asturiana, polo que yá se tienen desarrollao delles actuaciones na so escombrera y el restu d'instalaciones abandonaes. Nel momentu de redaición del presente artículu hai un proyeutu activu del programa LIFE (SUBproducts4LIFE-16-481), financiáu pola Comisión Europea qu'actúa de manera intensiva nesti espaciu.

La Tesis Doctoral de Luque-Cabal (1985), que sigue siendo un trabayu de referencia sobre los xacimientos de mercuriu asturianos, propón la so clasificación en cuatro distritos: Somiedu, Cuenca Carbonífera Central, Beleñu-Ribeseya y Picos d'Europa. Esti trabayu céntrase en tres mineralizaciones del distritu de la Cuenca Carbonífera Central, mui averaes a la llocalidá de La Pola (Llena) que foron oxetu de desarrollu mineru nel valle de Muñón: La Soterraña, Brañalamosa y La Maramuniz. En toles tres, como casi na totalidá de les mineralizaciones de mercuriu d'Asturies, existe una intensa anomalía xeoquímica n'arsénicu, que nel so momentu tamién s'esplotó como subproductu, dexando una contaminación fuerte d'esti peligrosu metal pesao nes escombreres (Marqués, 2020), y que preocupa sobre manera pola condición de güérfanes de les mines.

L'oxetivu principal de la investigación que s'espón equí ye'l de conocer l'estáu de les escombreres de les tres mines citaes como posible fonte de contaminación por arsénicu del agua natural nel momentu anterior a l'actuación so-



ARRIBA

Figura 1. Allugamientu de les parroquies de Muñón Cimieru y Muñón Fondiru, nel conceyu de Llena, nes que s'atopen les escombreres de la mina oxetu d'estudiu.

bre La Soterraña del proyeutu SUBproducts-4LIFE-16-481. Les conclusiones estrayíes puen orientar les actividaes futures y evaluar si l'efectu de les que se tán desarrollando ta siendo positivu pa la descontaminación por arsénicu que sufre'l valle.

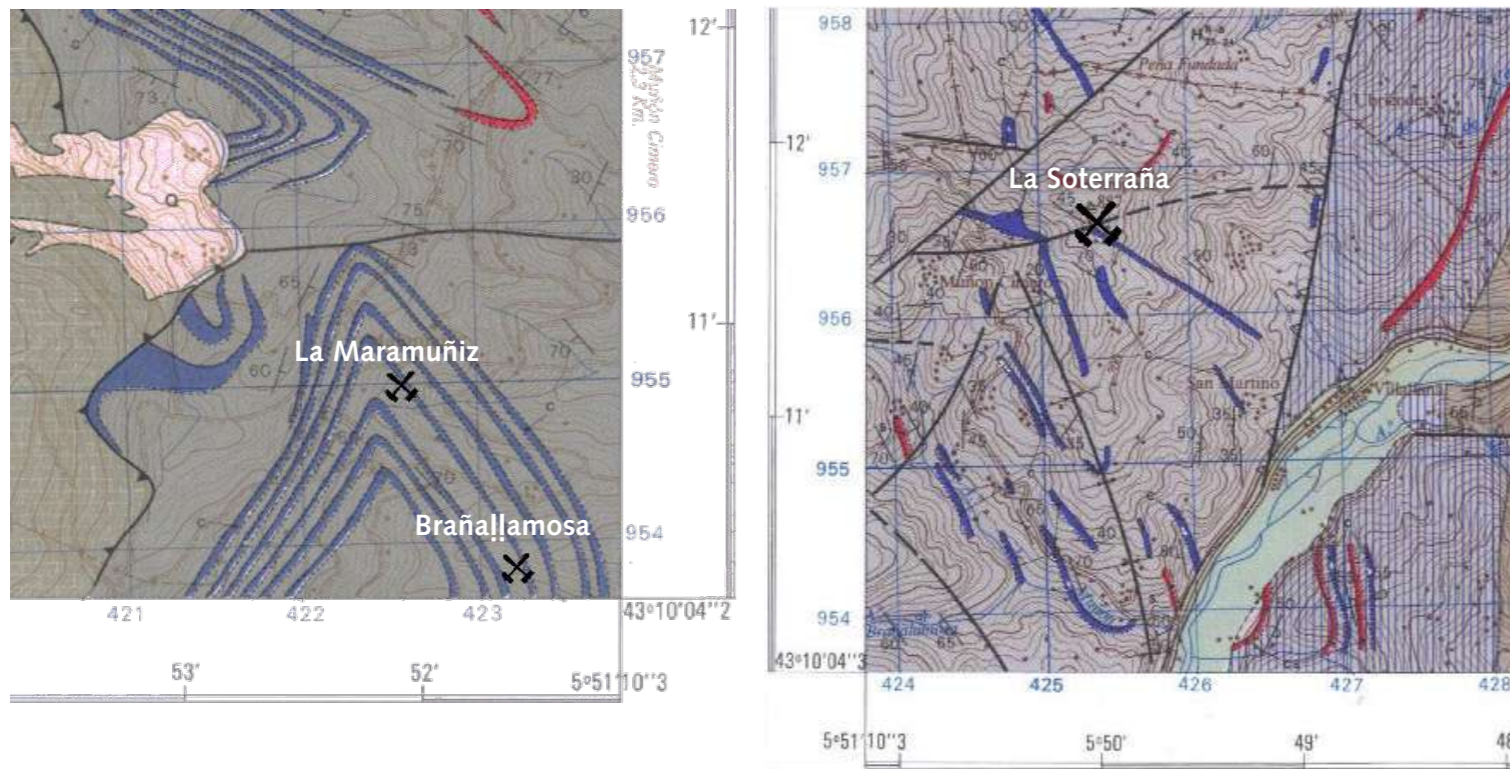
Pa trabayar nesti oxetivu, analizáronse, nel periodu anterior al entamu de les actuaciones d'igua, l'agua llixiviáu de mou natural de les escombreres de les mines seleicionaes, poniendo especial atención al conteníu n'arsénicu. Amás, la investigación inclúi una comparanza colos datos históricos disponibles y una correllación colos datos de precipitación meteórica llocal.

ALLUGAMIENTU Y CONTESTU XEOLÓXICU

Les tres mines antigües oxetu d'estudiu atópanse nel valle del regueru Muñón, nel conceyu de Llena (Principáu d'Asturies): la de Brañalamosa na parroquia de Muñón Fondiru y les de La Soterraña y La Maramuniz na de Muñón Cimieru. La Figura 1 presenta un mapa col allugamientu de dos parroquies nel conceyu Llena.

Brañalamosa: averada a l'aldea del mesmu nome. Éntrase per una pista embreada que percuerre'l marxe izquierdu del regueru que tamién recibe'l mesmu nome de Brañalamosa. El llabor mineru desarrollóse en dambos márxe-nes, en cotes próximes y superiores a les del propiu regueru. El pozu vertical tovía ye visible nel campu y les galeríes que siguen abiertas ensin nenguna proteición, y peles que se pue circular con precaución. Nel so interior quedaron abandonaes tolves, vagonetes y canalizaciones. Tres del zarru de la mina, estendiéronse dalgunes de les escombreres pa rellenar finques de pastu o iguar caminos cercanos, polo qu'anguaño casi nun son a percibise nel campu. Enriba d'otres

En Brañalamosa, tres del zarru de la mina, estendiéronse dalgunes de les escombreres pa rellenar finques de pastu o iguar caminos cercanos, polo qu'anguaño casi nun son a percibise nel campu (namái que ye visible'l pozu vertical) pero, en La Maramuniz, les seños d'actividá minera malpenes se noten. La Soterraña foi, con diferencia, el xacimientu principal: víense abondosos restos d'instalaciones y una escombrera impresionante. Los llixiviaos d'esa escombrera corrien de contínuo pela cuneta de l'AS-231, y dellos materiales espardiéronse pela parroquia y aprovecharonse tamién de base na construcción de l'autopista AP-66 nos pasaos años ochenta.



ARRIBA

Figura 2. Mapes xeolóxicos col allugamientu de les mines. El primer mapa ta incluyíu na fueya de PROAZA [52] y el segundu na de MIERES [53], dambos de la serie 2 de la cartografía MAGNA (Mapa Xeolóxicu Nacional del Institutu Xeolóxicu y Mineru d'España).

medró un fayéu, pero tovía ye posible reconeceles xunto al calce del regueru. Mientres que la explotación tuvo activa, vertíase nel mesmu regueru pa que los materiales arrastraren na época de les llenes.

La Maramuniz: ta allugada aproximadamente a un quilómetru al oeste del pueblu que-y da nome, nel paraxe conocíu como El Mirión. Anguaño, éntrase pel camín AS PR-80 al que se llega pela carretera AS-231, unos 200 metros enantes de llegar al colláu d'El Cordal dende La Pola. Na zona atópense dellos puntos de llabor mineru pequeños y vieyos. Les galeríes, que tovía se reconocen, cegáronse na so mayor parte pa quitase de problemes col ganáu. Dellos otros signos d'actividá minera como los sucos y calicates, malpenes son a percibise nel paisaxe, magar que sí se conserven restos d'instalaciones vieyes xunto a la escombrera principal, d'unos 3.500 m², bien reconocible nel campu por nun tar casi recubierta de vexetación. Bordiándola pela so cota menor, recueye los llixiviaos un regueru pequeñu que vierte l'agua al regueru próximu de La Barraca.

La Soterraña: ye, con diferencia, el xacimientu principal. Más o menos a unos 500 metros del pueblu de Muñón Cimiru, na lladera suroeste del monte Las Campusas. Xusto a la vera de la carretera AS-231. Atópense abondantes restos de les instalaciones y una escombrera impresionante. Foi la explotación más importante de mercuriu de la zona, tanto pol volume de material estrayío, como pol estensu periodu d'esplotación. La escombrera ye mui voluminosa y perfectamente reconocible nel campu y nes imáxenes satelitales. Llendándola pela so parte occidental, circula un cursu d'agua pequeñu que va dar n'El Re-

gueru de Muñón unos 500 metros agua abaxo. Los llixiviaos de la escombrera cuerren de contínuo xunto col agua d'una canalización pela cuneta de la carretera y acaben vertiéndose directamente nesti pequeñu regueru. Sicasí, magar del peligru ambiental evidente, nos primeros años depués del cese de la explotación movilizaron la escombrera parcialmente ensin control, faciendo que parte de los sos materiales tean esparcidos per diferentes puntos, ensin determinar, de la parroquia. Amás, tamién s'aprovechó como material de base na construcción de l'Autopista'l Güerna (AP-66) nos años ochenta del sieglu XX.

La Figura 2 presenta mapes xeolóxicos col allugamientu de les tres mines oxetu d'estudiu.

Los xacimientos de mercuriu asturianos de la Cuenca Carbonífera Central asóciense davezu a falles direición NNE-SSO (como la falla de Payares d'alcuertu cola denominación d'Alonso *et al.*, 2009), que son frecuentes na zona más occidental d'esti sector. Tamién se destacó (Gutiérrez-Claverol & Luque-Cabal, 2010) la relevancia que pue tener otru sistema de falles de direición predominante E-W, como la falla de L'Aramu, puesto qu'en munches ocasiones los xacimientos d'esti sector llocalícense na confluencia de los dos sistemas. Tiense considerao qu'estos son de calter epitermal tardihercínicu (Luque *et al.*, 1989). Sicasí, la determinación de les edaes de dalgunos xacimientos de la Cordelera Cantábrica ta anguaño en revisión, y dalgunos xacimientos que se dataron tradicionalmente como tardihercínicos, gracias a métodos radiométricos, afítense agora como xurásico-cretácicos (Granado *et al.*, 2023), polo que la datación de les mineralizaciones ye entá una llinia d'investigación abierta.

Los materiales nos que s'atopa la mineralización son carboníferos, del Grupo Lena, que ta

constituyú por secuencies d'arenisques y dalgunes lutites con niveles carbonataos ente los que tamién hai dalgún nivel de carbón. Precisamente, los niveles carbonataos tán venceyaos de manera especial a la xénesis de los minerales de mena, sobre manera cinabriu, aunque tamién se citen piritita, calcopiritita, marcasita y rexalgar (Luque-Cabal, 1985).

METODOLOXÍA

P'algamar l'oxetivu propuestu fixo falta desendolcar una metodoloxía variada, qu'inclúi la esploración en campu y al traviés d'imáxenes satelitales, el muestréu de llixiviáu, l'análisis químicu del agua recoyío, la modelización xeoquímica del agua y el tratamientu de los datos al rodiu de les condiciones meteorolóxiques que puen influir nel patrón del llixiviáu.

Cartografía y xeorreferencia de les escombreres al traviés del GIS (Geographic Information System)

Contar con una cartografía xeorreferenciada de les escombreres ye fundamental pa la seleición de puntos afayadizos de muestréu. Marcar llendes y cartografíales al traviés de les observaciones de campu resulta cenciello nos casos de La Maramuniz y La Soterraña, al ser clara la esposición de los materiales y les evidencies de les formes nel relieve. Pela contra, nel casu de Brañañamosa, la cobertoria vexetal dificulta, cuando nun lo torga dafechu, atopar les llendes ente la escombrera y el suelu forestal.

Pa los tres allugamientos, a partir de la cartografía aportada pola tesis doctoral de Luque-Cabal (1985), que nos informa sobre la situación de les escombreres en tiempos próximos al zarru de les mines y teniendo en cuenta los cambeos importantes que, sobre too en La Soterraña su-

frieron dende entós, sacóse alantre la xeorreferenciación y dixitalización del mapa de les tres escombreres sobre'l mapa xeolóxicu y la imaxe satelital. Pa esta xera usóse'l programa QGIS, versión 3.28.5 y contóse coles Ortofotos del Plan Nacional d'Ortofotografía Aérea (PNOA) más actuales, del vuelu del añu 2020 (Institutu Xeográficu Nacional, 2020), correspondientes a les zones d'estudiu (fueyes 52, 53, 57, 58). Estos productos cuenten con una resolución de 25 cm (25 x 25 cm² per píxel).

Seleición de puntos de muestréu y toma de muestres

Ún de los trabayos más importantes d'esta investigación foi la recoyida de muestres del agua resultante del llixiviáu de les escombreres. Estos muestreos reduxéronse al periodu de tiempu ente avientu y abril, na estación de más agua previa al entamu de les actuaciones sobre la escombrera del proyeutu, por ser el momentu del añu nel que s'espera una llixiviación más activa.

Seleicionáronse dos puntos pal muestréu en cada escombrera. En toos ellos miróse de contar con ún permanente que xurdiera de la escombrera o que recoyera direutamente agua de llixiviáu. Les coordenaes de cada puntu de muestréu apúrrense nes imáxenes de la Figura 3.

En Brañañamosa, el primer puntu nuna corriente que brota de la propia escombrera, a la mesma cota d'El Regueru de Muñón, y el segundu nun filu d'agua que percuere la lladera, pel sucu rellacionáu cola explotación, dalgunos metros perriba y otros perbaxo de la superficie.

El primer puntu de recoyida en La Maramuniz ta a la vera d'una casetina auxiliar de les instalaciones mineres antigües, anguaño en desusu, axacente a una cuadra activa en branu, d'un bebederu de ganáu. El segundu allúgase

na parte baxa de la escombrera de la que sal direutamente un filu pequeñu d'agua constante, pelo menos a lo llargo'l tiempu de los muestreos.

Na escombrera de La Soterraña recoyéronse les muestres nel puntu onde l'agua del llixiviáu que circula pela llende inferior de la mesma vierte al regueru pequeñu que la llena pela so parte occidental. Los muestreos fixéronse en dambos cursos, xusto enantes de la confluencia.

Pa la recoyida y conservación de les muestres hasta'l so análisis, siguióse un protocolu estandarizáu que garantiza l'ausencia de contaminación y la estabilidá de la muestra. El protocolu establez la necesidá del fluxu d'agua constante nel puntu de recoyida, l'usu de guantes, l'almacenamientu en recipientes inertes descontaminaos y con zarros seguros, nun tocar nenguna superficie como'l llechu del calce que puea enturbiar l'agua, la midida instantánea del pH, l'amiestu de dos gotes d'ácidu nítrico en cada muestra pa evitar posibles precipitaciones y la conservación en menos de 6 hores dende la recoyida nuna nevera de llaboratoriu a 8° C hasta'l momentu del análisis.

Les muestres recoyéronse cada 10±2 díes, ente los meses d'avientu de 2022 y abril de 2023, enantes del entamu de la movilización de tierres na escombrera de La Soterraña.

DERECHA

Figura 3. Allugamientu de los puntos de muestréu en Brañañamosa (enriba), La Maramuniz (en mediu) y La Soterraña (embaxo) sobre la foto satélite de Google Earth®. Las sigles amuesen l'etiquetáu emplegáu en cada puntu.



Análisis químico de les muestres

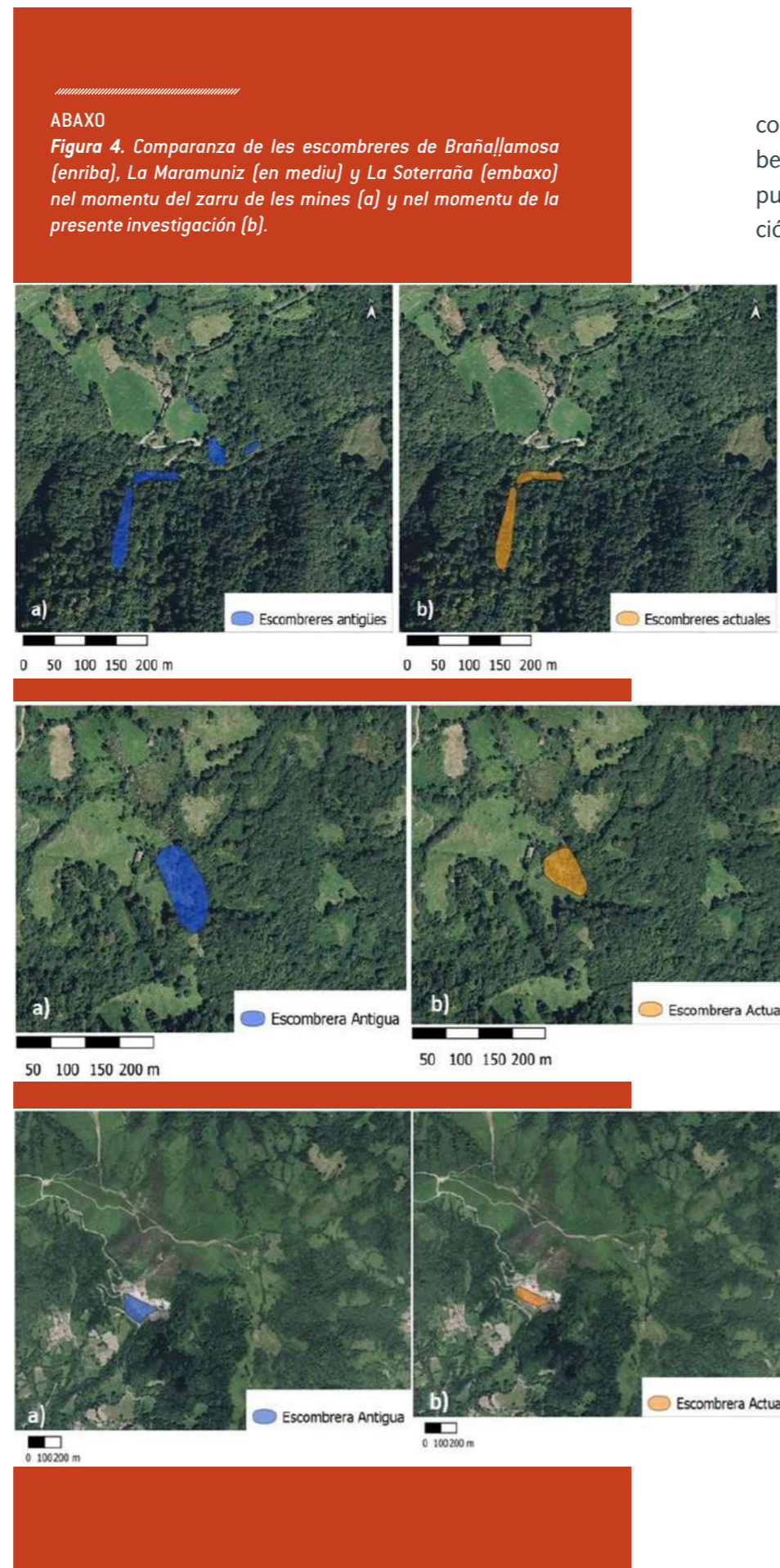
Los análisis del agua recoyío nel campu realizáronse nos Servicios Científico-Técnicos de la Universidá d'Uviéu. Determinóse la concentración d'arsénicu en toles muestres al traviés d'Espectrometría de Masas con Plasma Acopláu Inductivamente (ICP-MS). Amás, y a la vista de los resultaos, en dos muestres representativas —una de La Soterraña y otra de La Maramuniz— sacóse alantre un análisis completu de la concentración de B, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Hg, Tl, Pb y U, tamién al traviés d'ICP-MS, y de la concentración de los aniones: F⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻ al traviés de cromatografía iónica. Les dos muestres seleicionaes pal análisis químico completu foron les que tenien una concentración total d'As más asemeyada a la media de toles muestres del mesmu puntu de muestréu.

Per otra parte, hai que señalar que'l mesmu día de la so recoyida (y enantes de la so refrixeración), midióse'l pH de cada muestra con un pH-metru, correutamente calibráu en cada sesión con patrones de pH 4.01 y 7.00.

Modelización xeoquímica del agua

Desarrollóse una modelización xeoquímica del agua de les dos muestres pa les que se fixeron análisis químicos complexes. Pa ello, utilizóse'l programa PHREEQC Interactive 3.7.3 (Parkust & Apelo, 2013), del USGS, Serviciu Xeolóxicu de los Estaos Xuníos.

Na modelización utilizóse la base de datos *llnl.dat* (Lawrence Livermore National Laboratory, e.f.), qu'inclúi un conxuntu completu de datos termodinámicos recopilao pol Lawrence Livermore National Laboratory y ye considerada una base de datos mui afayadiza pa la modelización d'agua de la mina.



Los resultaos d'esta modelización permiten conocer la distribución d'especies nel agua y saber si existen fases que puean precipitar. Amás pue especulase sobre la base de la modelización, en rrellación cola posibilidá de precipitación de fases que contienen arsénicu nel ambiente de la propia escombrera.

Cálculos d'agua de caltriamientu meteorolóxicu

Pal discutiniu de los datos de concentración d'arsénicu nos lixivios, resulta importante conocer la cantidá del agua de lluvia que caltria na escombrera. Los cálculos de los parámetros meteorolóxicos rrellacionaos con esti agua de lluvia eficaz a partir de los datos de pluviometría y temperatura estrayéronse de l'aplicación TRASE-RO 2.0, desarrollada pola Diputación d'Alicante.

Los datos de partida refiérense a la estación meteorolóxica más próxima a la zona d'estudiu que ye la de Ronzón (Llena) y tán disponibles na base de datos de l'Axencia Estatal de Meteoroloxía d'España (AEMET, e.f.). A partir de los datos de precipitación y temperatura, el programa calcula y representa parámetros de datos como la evapotranspiración potencial y real, asina como la «lluvia útil», que ye la fracción que terminaría por caltriar na escombrera. Los fundamentos y el desarrollu del métodu puen consultase nel manual de l'aplicación (Diputación d'Alacant, 2005) y nes referencies qu'inclúi (Tabla 4).

RESULTAOS Y DISCUSIÓN

Cartografía de les escombreres na actualidá

Dende l'abandonu de les actividaes mineres hasta anguaño, les escombreres nes que se recoyeron los llixivios sufrieron cambeos que nun quedaron rexistraos na cartografía sistemáticamente. La situación actual y la evolución de caúna d'elles son mui estremaes. L'aplicación de la metodoloxía descrita nel apartáu anterior permite presentar la comparanza que s'amuesa na Figura 4.

En Brañallamosa, la escombrera nel marxe izquierdu del regueru ta desmantelada y los sos materiales esparíos per praos y caminos de la contorna. Pela cueta, na del marxe derechu, los materiales nun se movilizaron y, magar que reconocer les llendes seya difícil pola abundante vexetación de la viesca, pue afirmase que dende l'abandonu de la mina nun sufrió cambeos significativos na so estensión nin nes sos llendes.

En La Maramuniz esparióse una parte importante de los materiales pa rellenar sucos abundantes y escavaciones pequeñes rrellacionaes colos llabores, que, probablemente pol usu como pastizal que se da anguaño, resultaben molestes. Asina, el tamañu de les escombreres mermó de manera sustancial, aunque tovía se reconocen bien nel campu pola topografía y pola falta llamativa de vexetación qu'asoleya los materiales.

En La Soterraña, la escombrera sufrió cambeos drásticos. A lo primero del abandonu, amás del usu que dieron los vecinos de la zona, como s'indicó más arriba, movilizóse una parte importante del volume de los materiales pa rellenar la sub-base de l'Autopista'l Güerna AP-66. Nel momentu nel que se desarrolló esta investigación, la morfología de la escombrera presentaba una pareta artificial importante y una esplanada

na so cota más baxa —la más próxima a la carretera— na que s'asentaben los materiales movilizaos.

Análisis químicos

El conteníu n'arsénicu nes muestres procedentes del agua de les escombreres nos diferentes allugamientos amuésase na Tabla 1. Nun s'atopó arsénicu en nenguna de les muestres recoyíes en Braña||amosa.

Como pue observase, el conteníu d'arsénicu nos dos puntos seleicionaos pa La Soterraña ta dellos órdenes de magnitud perriba de lo que se pue tolerar nel agua pal consumu humanu (non superior a 10 ppb na normativa española del Real Decretu 3/2023 y nes recomendaciones de la OMS), o, inclusive, pa usos como'l riego (non perriba de 25 ppb d'alguerdu col Real Decretu 60/2011). Apréciase que la concentración ye dalgo mayor nel agua de la conducción artificial, polo que, a partir del puntu de muestréu, el regueru de Muñón baxa tovía más contamináu.

Nel casu de La Maramuniz, aunque les concentraciones son muncho menores que nel casu anterior, tamién se superen llixeramente les llendes pal consumu humanu nel agua que llega al bebederu y, inclusive, bastante más nel agua recoyío na parte baxa de la escombrera, que nun cumple los estándares mínimos nin siquiera pal riego.

En dambos casos apréciase una variación significativa de les concentraciones nos diferentes

Recoyida	Concentración d'As (ppb) (LQ=2ppb)			
	La Maramuniz		La Soterraña	
	Bebederu	Escombrera	Regueru	Cuneta
29/11/2022	14.93	126.77	35322.35	41532.55
10/12/2022	15.44	95.07	36634.21	34116.58
20/12/2022	16.78	93.17	34625.11	33250.48
02/01/2023	16.83	95.04	35250.36	32928.79
11/01/2023	13.07	86.71	31667.58	29985.45
20/01/2023	12.4	84.14	29514.29	29754.02
31/01/2023	15.26	85.21	31725.43	32260.17
09/02/2023	17.36	86.02	39533.81	34599.84
18/02/2023	13.58	86.71	43552.76	40837.89
02/03/2023	16.16	92.94	36237.60	32906.1
11/03/2023	11.57	116.63	39472.46	36680.75
20/03/2023	14.51	98.67	40260.21	42168.88
31/03/2023	16.25	90.57	41685.37	49421.26
20/04/2023	15.32	104.44	40266.83	43360.43
27/04/2023	18.17	107.12	40534.92	43518.9

puntos del muestréu, aunque se mueven siempre dientro del mesmu orde de magnitud, ensin que se vieren gradientes importantes o valores que, dientro de la serie de datos, puean considerase anómalos.

Anque esti estudiu ta centráu nel arsénicu, nes dos amueses representativas, seleicionaes colos criterios desplacaos na seición de metodoloxía, sacóse alantre un análisis químicu completu qu'ufierta los resultaos que s'amuesen na Tabla 2.

Tanto los datos de conteníu n'arsénicu como los del restu d'elementos son coherentes colos que figuren nos rexistros históricos del siguiemientu que se realizaron en La Soterraña y tamién colos pocos disponibles qu'hai pa La Maramuniz y Braña||amosa (Marqués, 2020).

IZQUIERDA

Tabla 1. Concentración d'As nos llixiviaos de les escombreres de les mines abandonaes de La Maramuniz y La Soterraña.

Elementos ppb	La Maramuniz	La Soterraña	LQ (ppb)
B	-	56,81	20
Na	2917,14	21904,54	200
Mg	19460,57	27234,02	200
Al	-	-	20
K	3538,80	14896,46	200
Ca	59203,48	235837,12	200
Ti	-	-	2
V	-	11,91	2
Cr	-	-	2
Mn	-	-	2
Fe	-	-	2
Co	-	-	2
Ni	-	-	2
Cu	-	-	2
Zn	-	-	2
As	93,17	36634,21	2
Se	-	3,67	2
Sr	388,72	3247,53	2
Mo	-	8,97	2
Ag	-	-	2
Cd	-	-	2
Sn	-	-	2
Sb	-	59,88	2
Ba	27,02	28,51	2
Hg	-	0,56	0,2
Tl	-	-	2
Pb	-	-	2
U	0,55	0,82	0,2
ppm			
F-	0,14	0,68	0,02
Cl-	634	12,33	0,2
SO4-2	48,42	616,47	0,2
NO-3	552	2,804	0,2

DERECHA

Tabla 2. Composición de les muestres representativas de los llixiviaos de les escombreres estudiaes en La Maramuniz y La Soterraña.

Modelización con PHREEQC

La complexidá del agua que se muestrea y un importante número d'especies y fases que puen formase colos elementos analizaos, ufierta una modelización xeoquímica complicada.

De les posibles fases que podríen formase nos sistemas modelizaos, la modelización namás prediz que podríen precipitar mercuriu nativu (Hg), barita (BaSO₄), tiemannita (Sb(OH)₃) y un óxidu d'antimoniu (Sb₂O₄). Los índices de saturación pa caúna d'elles amuésense na Tabla 3. Na mesma tabla recuéyense los índices de saturación pa les fases que contienen arsénicu.

Asina, d'alguerdu cola modelización, toles especies d'As, un total d'onze en La Soterraña y dos en La Maramuniz, tán disueltas y, polo tanto, la so movilidad nel mediu rural ye mui alta, cola peligrosidá qu'esti elementu biollimitante supón nel mediu natural.

Les fases sólides d'arsénicu que podríen suponer la so eliminación del agua namás van apaecer en periodos enforma secos. En tal casu, por mor de la so alta solubilidá, estes fases puen considerase como efímeres nes escombreres y con cualquier episodiu de lluvia volveríen al sistema acuosu.

Fases	Índiz de Saturación	
	La Maramuniz	La Soterraña
Barita	-	0,52
Hg (nativo)	-	4,9
Sb(OH) ₃	-	0,79
Sb ₂ O ₄	-	6,4
Tiemannita	-	4,4
Arsenolita (As ₂ O ₃)	-96,76	-22,66
As	-70,09	-33,04
As ₂ O ₅	-98,87	-24,77
As ₄ O ₆ (cubi)	-193,39	-45,17
As ₄ O ₆ (mono)	-193,16	-44,95

«Lluvia útil» nel periodu de muestréu

A partir de los datos rexistraos pola Axencia Estatal de Meteoroloxía (AEMET) pa la zona d'estudiu del periodu tratáu, el programa TRASERO ofreció los resultaos d'agua de «lluvia útil»; ye dicir, la que caltria na escombrera y que ye quien a producir llixiviaos. Estos valores son los que se recueyen na tabla 4.

DISCUTINIU XENERAL

A la lluz de los datos presentaos nel apartáu anterior pue dicise que les escombreres de les mines de Brañalamosa, La Maramuniz y La Soterraña representen tres casos bien distintos d'aporte d'arsénicu al agua natural.

D'elles, la que presenta una situación más preocupante ye La Soterraña. Los datos del presente estudiu son coherentes colos rexistros históricos y colos qu'aporten dellos proyeutos d'investigación que se desarrollaron y siguen en desarrollu pa intentar iguar la situación. Atendiendo namás al conteníu n'arsénicu, l'agua que circula al rodiu de la escombrera y que recueye los sos llixiviaos

Día	LLU (mm)	Día	LLU (mm)	Día	LLU	Día	LLU (mm)
20/11/2022	0	30/12/2022	0	08/02/2023	0	20/03/2023	0
21/11/2022	0	31/12/2022	0	09/02/2023	0	21/03/2023	0
22/11/2022	1,26	01/01/2023	0	10/02/2023	0	22/03/2023	0
23/11/2022	0	02/01/2023	0	11/02/2023	0	23/03/2023	0
24/11/2022	5,18	03/01/2023	0	12/02/2023	0	24/03/2023	0
25/11/2022	0	04/01/2023	0	13/02/2023	0	25/03/2023	0
26/11/2022	0	05/01/2023	0	14/02/2023	0	26/03/2023	0
27/11/2022	2,74	06/01/2023	0	15/02/2023	0	27/03/2023	0
28/11/2022	0	07/01/2023	0	16/02/2023	0	28/03/2023	0
29/11/2022	0	08/01/2023	0	17/02/2023	0	29/03/2023	0
30/11/2022	0	09/01/2023	0	18/02/2023	0	30/03/2023	0
01/12/2022	0	10/01/2023	0	19/02/2023	0	31/03/2023	0
02/12/2022	0	11/01/2023	0	20/02/2023	0	01/04/2023	0
03/12/2022	0	12/01/2023	0	21/02/2023	0	02/04/2023	0
04/12/2022	0	13/01/2023	0	22/02/2023	0	03/04/2023	0
05/12/2022	0	14/01/2023	0	23/02/2023	2,02	04/04/2023	0
06/12/2022	0	15/01/2023	0	24/02/2023	1,66	05/04/2023	0
07/12/2022	0	16/01/2023	30,98	25/02/2023	14,2	06/04/2023	0
08/12/2022	0	17/01/2023	12,42	26/02/2023	0	07/04/2023	0
09/12/2022	10,52	18/01/2023	27,56	27/02/2023	0	08/04/2023	0
10/12/2022	0	19/01/2023	24,91	28/02/2023	0	09/04/2023	0
11/12/2022	0	20/01/2023	16,2	01/03/2023	4,19	10/04/2023	0
12/12/2022	13,39	21/01/2023	7,22	02/03/2023	0	11/04/2023	0
13/12/2022	0	22/01/2023	0	03/03/2023	0	12/04/2023	0
14/12/2022	0	23/01/2023	0	04/03/2023	0	13/04/2023	0
15/12/2022	2,8	24/01/2023	2,29	05/03/2023	0	14/04/2023	0
16/12/2022	1,62	25/01/2023	0	06/03/2023	0	15/04/2023	0
17/12/2022	0	26/01/2023	12,24	07/03/2023	0	16/04/2023	0
18/12/2022	0	27/01/2023	19,42	08/03/2023	0	17/04/2023	0
19/12/2022	0	28/01/2023	9,7	09/03/2023	0	18/04/2023	0
20/12/2022	0	29/01/2023	0	10/03/2023	0	19/04/2023	0
21/12/2022	0	30/01/2023	0	11/03/2023	0	20/04/2023	0
22/12/2022	0	31/01/2023	0	12/03/2023	0	21/04/2023	0
23/12/2022	0	01/02/2023	0	13/03/2023	0	22/04/2023	0
24/12/2022	0	02/02/2023	0	14/03/2023	0	23/04/2023	0
25/12/2022	0	03/02/2023	0	15/03/2023	0	24/04/2023	0
26/12/2022	0	04/02/2023	0	16/03/2023	0	25/04/2023	0
27/12/2022	0	05/02/2023	0	17/03/2023	0	26/04/2023	0
28/12/2022	0	06/02/2023	0	18/03/2023	0	27/04/2023	0
29/12/2022	0	07/02/2023	0	19/03/2023	0	28/04/2023	0
						29/04/2023	
						30/04/2023	0

IZQUIERDA

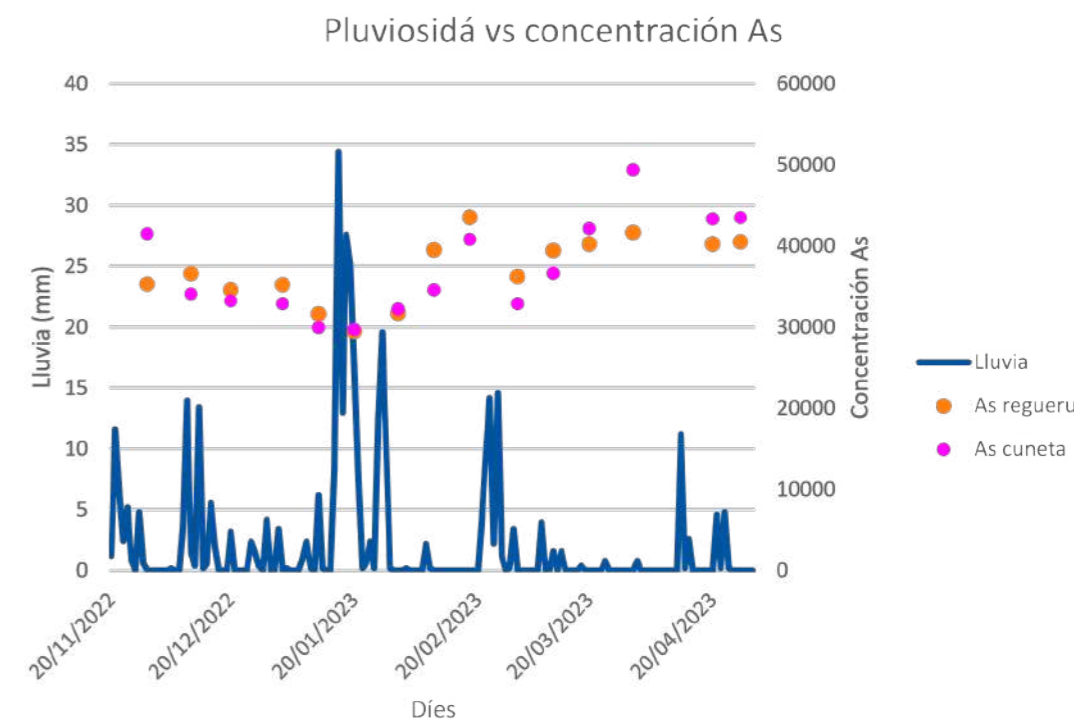
Tabla 3. Índices de saturación pa les especies d'As y les posibles especies que puen precipitar en La Soterraña.

DERECHA

Tabla 4. Valores estrayíos de «lluvia útil» (LLU). Una esplicación completa de los significaos d'esti parámetru ta descrita nel manual d'usuariu del programa TRASERO (Diputación de Alicante, 2005).

ABAXO

FIGURA 5. Pluviosidá frente a la concentración d'As estrayío de les muestres de La Soterraña.



ta contaminao dafechu d'arsénicu y El Regueru de Muñón supera en más de tres órdenes de magnitú les llendes llegalas pal consumu humanu o, inclusive, pal riego. Les eflorescencies qu'apaecen davezu son solubles y, lloñe de fixar arsénicu de forma defini-

tiva, tornen al sistema hídicu cuando terminen los periodos de seca que puen dase nel valle.

La gráfica de la figura 5 muestra la concentración d'arsénicu nes amueses analizaes de La Soterraña xunto colos datos de lluvia útil. Apréciese que nos periodos de seca les concentraciones d'As nos llixiviaos aumenten. La dilución que supón la lluvia, tanto nos regueros como na cantidá d'agua que caltriaría nes escombreres, fai menguar les concentraciones. Sicasí, la correlación

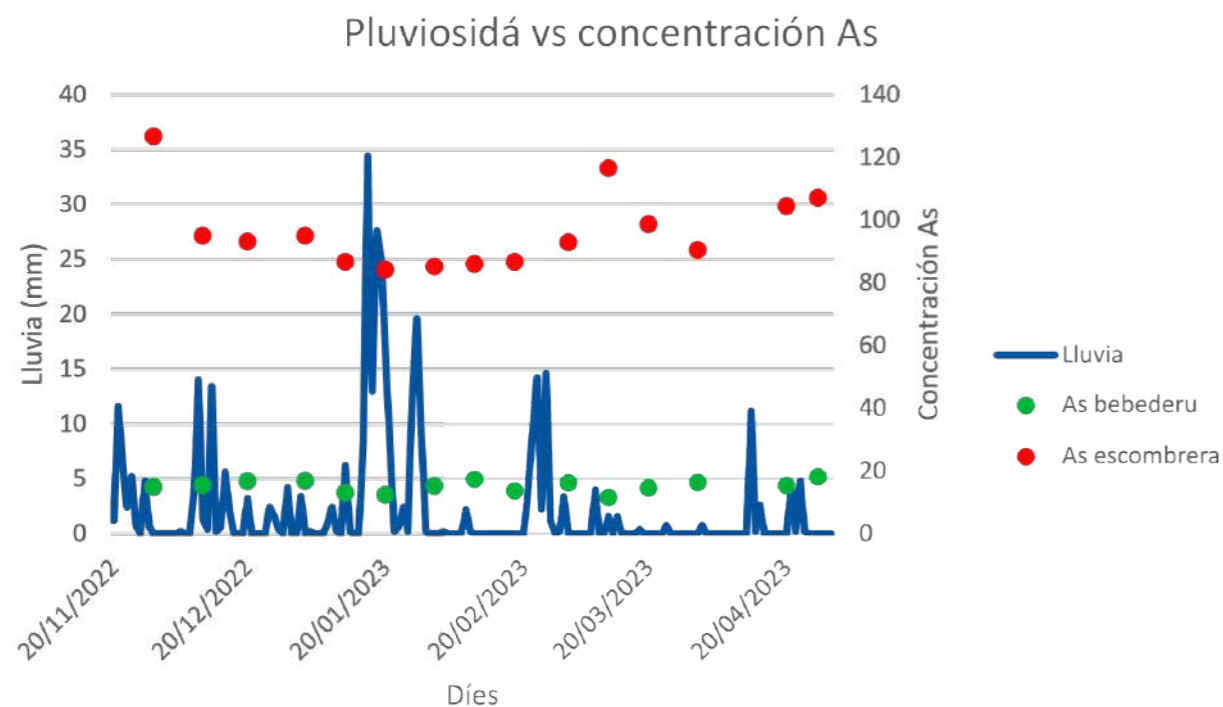
namás ye cualitativa, por mor de que la cinética de los procesos de disolución ye complexa y rique de tiempos d'axuste.

En La Maramuniz, como espeya la Figura 6, les concentraciones d'As son sensiblemente más altes na parte baxa de la escombrera, por mor de que l'agua llixiva un volume mayor de material contaminao. La correllación ente «lluvia útil» y concentración d'arsénicu ye menos clara qu'en La Soterraña, anque sí llega apreciase nos periodos con más díes siguios ensin agua.

Magar que les muestres d'agua recoyies en Brañañamosa nun tengan conteníos n'As en concentraciones perriba de les llendes de detección instrumentales, nun se descarta que los materiales tean contaminaos, pero la cantidá importante d'agua que circula pela lladera de manera soterraña o superficial indiquen qu'a la escombrera llávala otra agua amás de la lluvia. La dilución d'As nesti agua baxa la so concentración perbaxo de lo detectable.

ABAXO

Figura 6. Pluviosidá frente a la concentración d'As remanao de les amueses de La Maramuniz.



CONCLUSIÓN

Les escombreres de les mines de mercuriu del sector noroccidental de L Lena presenten situaciones bien estremaes, asina como la so incidencia na contaminación por arsénicu nel valle de Muñón.

Con diferencia respetu de les demás, la de La Soterraña ye la escombrera más grande y más peligrosa pola so contaminación. Sicasí, les mines de Brañañamosa y La Maramuniz entren na categoría de mines güerfanos dende que zarren y los cambeos de les escombreres débense a un aprovechamientu menos controláu pola población llocal que, de manera esporádica, usa los sos materiales como rellenos en praos o caminos. Esti trabayu presenta una cartografía de les tres escombreres que compara la situación cola qu'había nel momentu del zarru de les tres explotaciones.

L'aspeutu nel campu de les escombreres estudiaes, en cuantes al desarrollu del suelu y la cobertura vexetal, correllaciónase bien colos conteníos n'arsénicu. Sobre la escombrera de Brañañamosa, con menor conteníu n'arsénicu, desarrollóse un fayéu y vexetación propio de soviesca y, nun siendo pola presencia de galeríes, pozos de ventilación y rastros de dalgunos sucos, ye práuticamente irreconocible. D'otra manera, la escombrera de La Soterraña ye perfeutamente reconocible y nun presenta casi vexetación. Amás, periódicamente, desarrollense eflorescencies. En La Maramuniz, con

conteníos intermedios n'arsénicu ente les dos anteriores, la vexetación desarróllase con dificultá y les llendes de la escombrera colos praos más apegaos ye mui evidente nel campu.

L'agua analiza en Brañañamosa que procede de la escombrera y vierte nel regueru del mesmu nome, nun tien conteníos n'arsénicu que puean detectase coles téuniques emplegaes nesti trabayu. Sicasí, tanto la de La Soterraña como la de La Maramuniz presenten concentraciones d'esti elementu que superen los conteníos recomendaos pa l'agua de consumu humanu y, nel casu de La Soterraña, en dellos órdenes de magnitú perriba. Na mayoría de los casos, tamién se superen les concentraciones almisibles como agua de riego. L'allugamientu de les mines nun valle nel qu'hai numberoses aldees qu'usen l'agua de los regueros pal riego y p'abebentar el ganáu, tien de tener en cuenta esti peligrosu.

La modelización xeoquímica del agua analiza en La Maramuniz y La Soterraña indica que, nos puntos de muestréu, la totalidá del arsénicu ta disuelto nel agua, polo que ye mui móvil. Les fases d'arsénicu namás precipitaríen en condiciones de falta d'agua. Por mor de la so alta solubilidad, en casu de la llegada d'agua, vuelve fácilmente al sistema acuosu. Por ello, l'agua ye un factor clave pa l'apaición y movilidad de les fases d'arsénicu nel mediu ambiente.

Anque fore de forma cualitativa, atopóse la correllación lóxica inversa ente la concentración

d'arsénicu nel agua que sal de les escombreres de La Soterraña y La Maramuniz y l'agua de lluvia eficaz nel periodu consideráu.

Por too ello, hai que resaltar la necesidá d'una xestión correuta de los residuos xeneraos pola minería y la importancia de considerar los factores ambientales y climáticos na evaluación del so impautu. La presencia d'otres sustancies, como'l mercuriu, y la so posibilidá de precipitación planteguen preocupaciones complementaries por mor de la so toxicidá y capacidá de bioacumulación nos ecosistemas acuáticos. Los resultaos algamaos nesti trabayu dan información pal diseñu d'estratexes d'amenorgamientu y monitoréu ambiental n'árees mineres y datos llocales pa la evaluación de les actuaciones presentes y futures nes escombreres de les tres mines estudiaes.

Referencies bibliográfiques

- AEMET = Axencia Estatal de Meteoroloxía. (e. f.). *AEMET OpenData* [base de datos en llinia]. <https://opendata.aemet.es/>
- Alonso, J.L., Marcos, A. & Suarez, A. (2009). Paleogeographic inversion resulting from large out of sequence breaching thrusts: The León Fault (Cantabrian Zone, NW Iberia). A new picture of the external Variscan Thrust Belt in the Ibero-Armorican Arc. *Geologica Acta* 7(4), pp. 451-473.
- Centru Nacional d'Información Xeográfica del Institutu Xeográficu Nacional (CNIG del IGN). (2023). *Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional* [base de datos en llinia]. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Diputación d'Alacant. (2005). *Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Simulación de modelos de flujo en acuíferos: Manual del usuario de la aplicación TRASERO* [base de datos en llinia]. <https://ciclohídrico.com/descargas/aplicaciones/>
- Google Earth. (2023). *Google Earth* [base de datos en llinia]. <https://earth.google.com/>
- Google Maps. (2023). *Google Maps* [base de datos en llinia]. www.google.es/maps
- Granado, P., Ruh, J. B., Guillong, M. & Rodríguez-Terente, L. (24–28 d'abril del 2023). *New constraints from structural data and U-Pb calcite geochronology on La Collada fluorspar ore body (Asturian basin, NW Spain)* [ponencia]. *EGU General Assembly 2023*, Viena, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7298>
- Gutiérrez-Claverol, M. & Luque-Cabal, C. (2010). *Riquezas geológicas de Asturias*. Madrid: Institutu Xeolóxicu y Mineru d'España (IXME) [llibru dixital]. <https://www.igme.es/>
- Institutu Xeográficu Nacional. (2020). *Ortofotos del Plan Nacional d'Ortofotografía Aérea (PNOA), vuelu 2020, fueyes 52, 53, 57, 58* [base de datos cartográfica en llinia]. <https://centrodedescargas.cnig.es/>
- Lawrence Livermore National Laboratory (e. f.). *llnl.dat: thermodynamic database for PHREEQC* [base de datos en llinia]. <https://rdr.io/cran/phreeqc/man/llnl.dat.html>
- Luque-Cabal, C. (1985). *Las Mineralizaciones de Mercurio en la Cordillera Cantábrica*. [Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidá d'Uviéu].
- Luque, C., García-Iglesias, J. & García-Coque, P. (1989). Características geoquímicas de los cinabrios de la cordillera cantábrica (NW de España): Utilidad en prospección. *Trabajos de Geología* 18, pp. 3-11.
- Luque Cabal, C. & Gutiérrez Claverol, M. (2006). *La minería del mercurio en Asturias. Rasgos geológicos*. [Autoedición].
- Marqués, A. L. (2020). *Modelización de la incidencia de la minería abandonada de mercurio en la cuenca del río Nalón: correlación de eventos y análisis de riesgos*. [Tesis Doctoral inédita, Universidá d'Uviéu].
- Parkhurst, D. L. & Appelo, C. A. J. (2013). *Description of input and examples for PHREEQC version 3: A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Reston: U.S. Geological Survey (Techniques and Methods, 6-A43).
- Real Decretu 3/2023, de 10 de xineru, *pol que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidá del agua de consumu, el so control y suministru*. *Boletín Oficial del Estado*, 9, de 11 de xineru del 2023. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/01/10/3>
- Real Decretu 60/2011, de 21 de xineru, *sobre les normes de calidá ambiental nel ámbitu de la política del agua*. *Boletín Oficial del Estado*, 19, de 22 de xineru del 2011. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2011/01/21/60>

Naturalización urbana y de los ejemplos en Xixón

Desde que el ser humano entamó la construcción de casas para la supervivencia empezó a quitar terreno a la naturaleza. Sin embargo, ello no quita para que se incluyeran elementos vegetales en nuevas edificaciones.

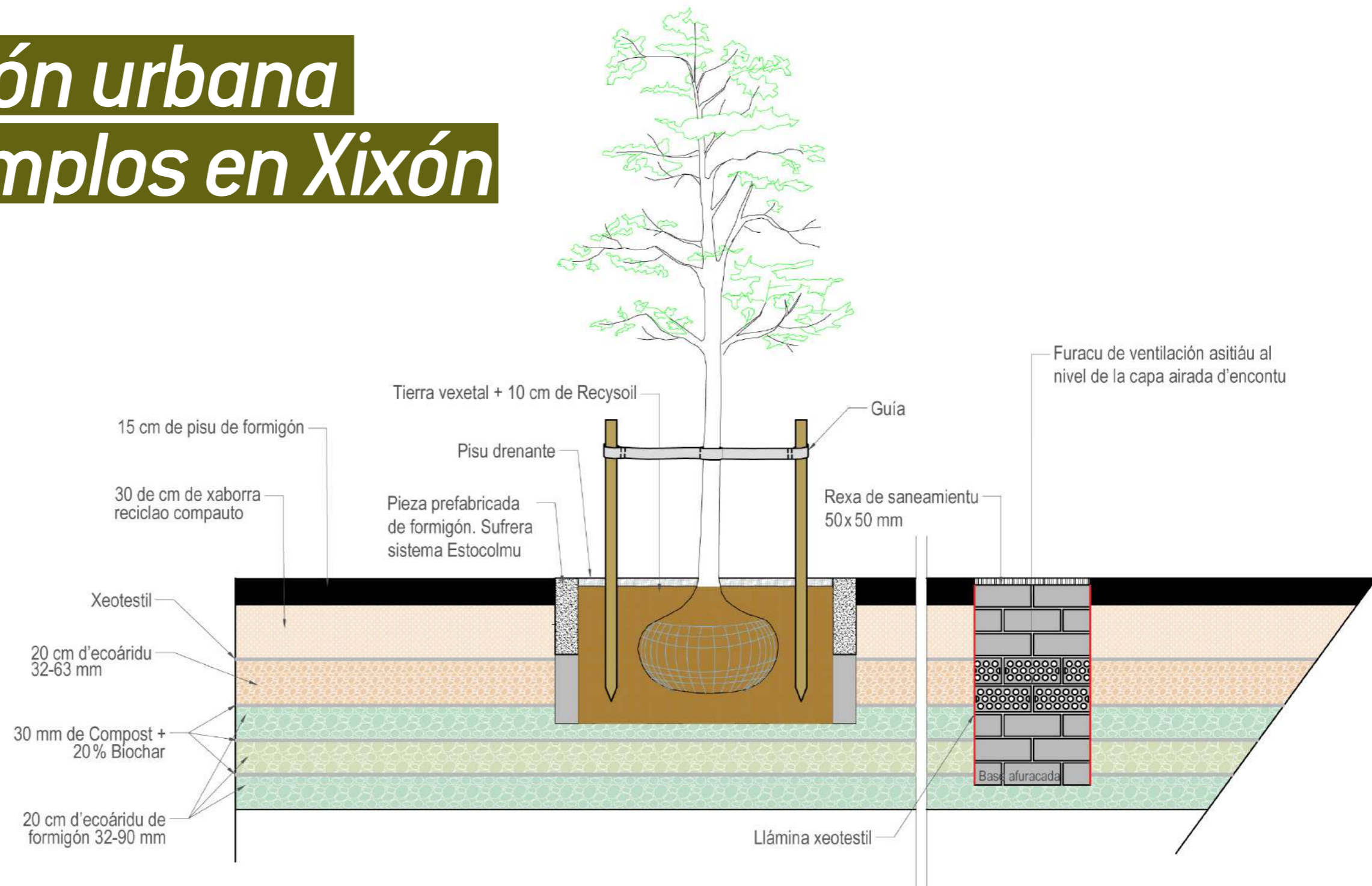
El origen de la agricultura allugase en Mesopotamia entre los ríos Éufrates y Tigris, en el Creciente Fértil, gracias a los sistemas de riego que hacían productivas aquellas tierras secas. En esa zona se da origen a la primera civilización culta del mundo: la sumeria, siendo Babilonia una de las ciudades-estado a las que va dar origen esa civilización. Babilonia, de la que son referente los jardines colgantes, que representa con claridad la incorporación de los elementos vegetales a las construcciones de esas civilizaciones tan tempranas.

Por **Xuan Carlos Martínez Sánchez**

Ingeniero agrícola

Ex-Xardinero Mayor na Casa Conceyu de Xixón

Semeyes de **José Ángel Diego**



Esquema de la plantación por Sistema Estocolmu.

Asina mesmo, y próximos xeográficamente, los asirios tamién construyeron abondos xardinos nes sos ciudaes, y con estremaes funciones.

Ciro'l Grande va crear en Persépolis, lo que podría considerase'l centru del mundu civilizáu nel sieglu VI a. C.: una ciudá impresionante que tamién va incorporar superficies grandes de xardinos que, amás, podien observase dende los salones d'audiencies, siendo símbolu del poder de los gobernantes y valiendu d'inspiración a los palacios fortaleza mongoles de La India. La civilización exipcia, nacida tamién en base a la fertilidá de les tierres inundaes por El Ríu Nilu, va incorporar al llau de les edificaciones zones axardinaes, cuasiqye mezclando cultivos y plantes d'ornamientu que non solo representaben

La civilización china va incorporar xardinos extraordinarios, reservaos sobre manera pa les clases pudientes. Entavía anguaño pue esfrutase, por exemplu, de los xardinos imperiales de Pekín, que son un verdaderu presumiciu de teunoloxía y conocimientu nel que puen apreciase planteamientos paisaxísticos nos que sorprenden l'agua y les elevaciones artificiales vexetales pol so tupíu esplendor. Asina mesmo, la cultura xaponesa bebe de la cultura china y da unos elementos axardinaos, enllenos de naturaleza y simbolismu.

La cultura islámica produz xardinos espléndidos nos que l'agua tien un papel fundamental como elementu prestosu pol ruxerrux de so y el gociu visual del movimientu, lo que tamién val pa xenerar frescor. El pasu a occidente por mor

El Renacimientu recupera esa tendencia, creando axardinamientos de gran esplendor, pero reservaos en mayor medida a les clases pudientes. Lo mesmo va pasar nel mundu barrocu nel que son representativos los xardinos de Versailles y Vaux-le-Vicomte na Francia de Luis XIV. Pela contra, la escuela inglesa de paisaxismu, qu'entama nel sieglu XVIII un estilu naturalísticu, fuxe d'esos patrones ríxidos del barrocu francés, recreando paisaxes naturales, aunque domesticaos ya incorporando'l paisaxe esterior al xardín en sí mesmu. Davezu, estos parques teníen una gran estensión, pero taben tamién reservaos a les clases pudientes y a l'aristocracia.

Nel sieglu XIX entama lo que podríamos considerar el precedente del espaciu verde públicu modernu. En París, el Barón Haussmann, col sofitu de Napoleón III, ruempe la ciudá medieval y crea unes aveníes grandes nomaes bulevares,

que sirven dempués d'exa a un rosariu de xardinos públicos. N'Austria, Camillo Sitte escribe *L'arte de construyir ciudaes* (1889), reivindicando los espacios urbanos a la escala d'home y árbol.

En París, el Barón Haussmann crea unes aveníes grandes nomaes bulevares, que sirven dempués d'exa a un rosariu de xardinos públicos. N'Austria, Camillo Sitte escribe *L'arte de construyir ciudaes* (1889), reivindicando los espacios urbanos a la escala d'home y árbol.

aspectos estéticos, sinón que contribuyíen a la comodidá de los habitantes proporcionando solombra y frescor.

Pela parte de so, l'antigua Grecia va incorporar el paisaxe esterior a les propies ciudaes, prescindiendo, en munchos casos, de fortificaciones que podríen aislales de la naturaleza de la rodiada. La civilización romana taba enllena de villes con patios axardinaos na periferia de les grandes ciudaes y Roma tenía grandes parques distribuyíos de mou irregular en función de les clases sociales —el mesmu Xulio César y dalgunos otros nobles promovieron y cedieron espacios grandes de les sos tierres pa iguar zones verdes que meyoraren la calidá de vida de los barrios probes—.

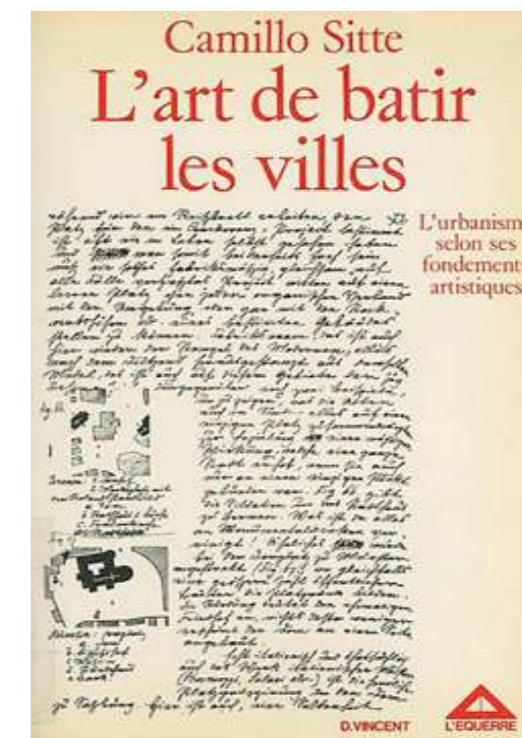
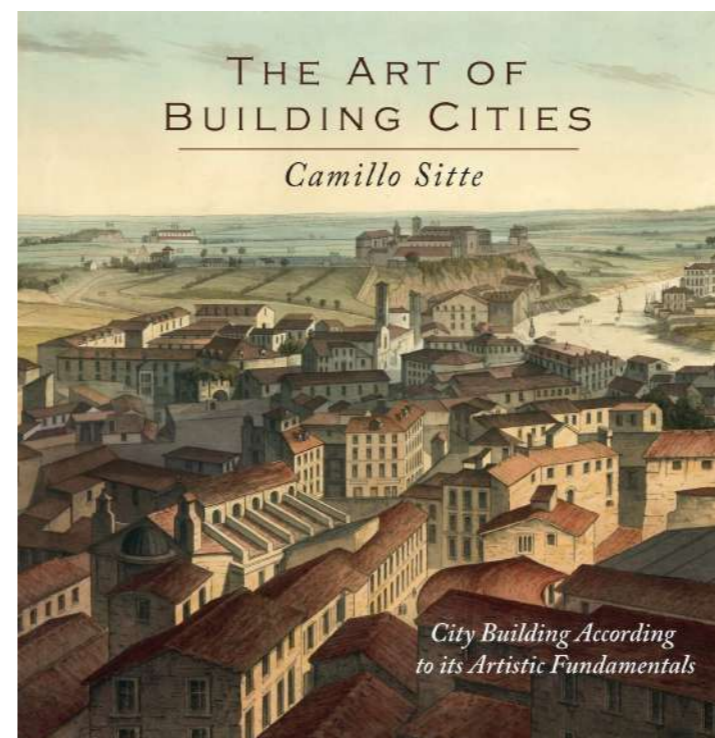
de la espansión islámica na península ibérica produz espacios axardinaos con un valir estéticu y natural mui altu que tien el máximu esponente na Alhambra de Granada.

Les civilizaciones precolombines, caúna coles sos particularidaes propies, incorporen a les ciudaes elementos vexetales, conformando axardinamientos, munches vegaes combinaos con cultivos agrícolas.

Nel mundu occidental, la decadencia del Imperiu romanu derivó nuna Edá Media que provocó un parón nel desarrollu de lo natural nes ciudaes, asina como n'otros aspectos culturales, y la incorporación d'elementos vexetales a les zones habitaes quedó práuticamente reservada a los claustros monacales.

ABAXO

Versiones inglesa (Martino Fine Books), francesa (D. Vincent L'Equerre) y castellana (germinArq.) de la obra de Camillo Sitte.





ARRIBA

Figures 1 y 2. Naturalización de l'Avenida d'El Molinón, nel Parque d'Isabel la Católica (enantes y dempués) de Xixón.

Nesti sieglu, les ciudaes crecen en base a la industrialización, y, poro, orixinen un éxodu del campu a la ciudá, lo que xenera barrios obreros nos que l'amontonamientu de la población provocaba condiciones de vida insalubres. Colos planteamientos favorecíos poles propuestes de los hixenistes promuévese la creación de parques p'amenorgar les dures condiciones ambientales de vida de la población trabajadora. Asina, créase'l parque Birkenhead nel Liverpool de 1847, proyeutáu pol paisaxista inglés Paxton pa dar rempuesta a les necesidaes de la población y que vien a ser reconocíu como'l primer parque públicu del mundu modernu. En Los

Estaos Xuníos, a mediados del sieglu XIX, na ciudá de Nueva York, la corporación municipal decide crear un parque públicu y grande pa responder a la necesidá d'espardimientu de la población creciente derivada de la migración europea. Anque nun taba planificáu nel Plan de los Comisarios de 1811 (el plan d'ordenación de la ciudá de Nueva York). Escuéyese al arquitectu inglés Vaux y al paisaxista Olmstead, que proyeuten un parque maraviosu de 341 hectárees: el famosu Central Park de Nueva York.

L'éxodu de contínu de población dende les zones rurales pa les ciudaes, principalmente a finales del sieglu XIX y nel XX, atrayió a los polos

de l'actividá industrial, provocó que se conformaran ciudaes grandes, delles veces de dimensiones escomanaes. N'España, anque les conurbaciones nun llegaron al tamañu d'otros países, sí que se dio un crecimentu de ciudaes de calter alministrativu o industrial mui grande, y en munchos casos estraordinariamente rápidu. Esi crecimentu desordenáu desplícase davezu por un planteamientu urbanísticu relaxáu o inexistente, que derivó nunos modelos de ciudá con cases de baxa calidá, pero tamién mui baxa calidá de los espacios llibres.

EL CASU ASTURIANU

Nel nuesu entornu próximu, n'Asturies, les ciudaes nun tenien cuasique espacios públicos qu'albergaren naturaleza. L'axardinamientu reducíase a places pequeñes y a dalgunos paseos románticos denominaos, davezu, alamees.

Tocante a les ciudaes grandes, la capital, Uviéu, pudo esfrutar d'un xardín monacal que yera de los franciscanos y qu'abre al públicu de manera temprana nel centru de la ciudá. Nel casu de Xixón, nos años trenta entámase la seca del porréu d'El Ríu Piles, dando llugar na

década siguiente al parque d'Isabel la Católica que, con una superficie d'unos quince hectárees, foi a lo llargo de munchísimos años el parque públicu y espaciu verde de la ciudá. **Avilés**, amás de dalgunes places públiques arboreaes y el parque del muelle, nun algama a tener, hasta finales de los años setenta, un parque públicu d'entidá cola adquisición d'un xardín priváu del palaciu de Ferrera. **Llangréu** y **Mieres**, con histories paraleles no qu'a zones públiques se refier, consiguen tener dos espacios verdes centrales: el parque Doráu de Sama y el parque Xovellanos de la villa d'El Caudal.

Poro, nun ye hasta'l sieglu XX y, en muchos casos, hasta bien entrada la segunda metada, cuando les ciudaes asturianas consiguen tener espacios verdes públicos d'entidá. Los conceyos democráticos, nel desarrollu de los planes urbanísticos, entamen a xenerar espacios verdes que puen facer frente a les necesidaes crecientes de naturaleza na ciudá, aunque seya una naturaleza domesticada. Les ciudaes asturianas, sobre manera les de vocación industrial y minera, sufrieron diferentes foles de migración, y énte la demanda continua de trabayadores, xeneraron la necesidá de dotar de vivienda de manera rápida, lo que creó barrios y edificaciones ensin urbanizar o con urbanizaciones de mui baxa calidá.

Hai que reseñar que, en dalgunos casos (y Bustiello, en Mieres, ye un bon exemplu), les cases d'obreros construyíes poles fábricas que-yos daben trabayu teníen criterios abondo meyores que les urbanizaciones públiques, xenerando espacios llibres y axardinaos qu'ayudaben a les rellaciones sociales y a una mayor calidá de vida dende un puntu de vista medioambiental. D'esa manera, xeneralizáronse cais estrenches con aceres que cásiqye nun esistíen y con unos servicios mui básicos nos que nun taba incluyida

Alex Shigo, ente otres coses, dexó claru'l modelu de corte de poda razonable, aunque siempre teniendo en cuenta'l so aforismu mil vegaes repetíu de que la meyor poda ye la que nun se fai.

nin la pavimentación de les zones rodaes. Hai muchos casos de barriaes de los años sesenta y setenta con edificios de cinco altures y con cais estrenches nes que'l sol y la lluz entraben con dificultá. Nun principiu, el tránsitu de coches yera mui pequeñu, pero taben sentaes les bases pa la crisis posterior.

DALGO SO LA XARDINERÍA URBANA Y L'URBANISMU

No que cinca al arboláu d'ornamentu, na cume de los elementos vexetales urbanos, el conocimientu de les bases fisiolóxicques modernes plasmáu na arboricultura moderna colos trabayos desarrollaos por Alex Shigo en Los Estaos Xuníos, supunxo un enantes y un dempués a la hora de planificar y xestionar l'arboláu urbano. Les aportaciones en fisioloxía vexetal o'l modelu plantegáu por Shigo d'aisllamientu de les firies que faen los árboles cola fin de defendese énte una aición mecánica esterna (barreres CODIT), suponen un fechu importante na arboricultura. Ente otres coses dexó claru'l modelu de corte de poda razonable, aunque siempre teniendo en cuenta'l so aforismu mil vegaes repetíu de que la meyor poda ye la que nun se fai.

Muchos investigadores, ente los que voi reseñar a los alemanes Frank Rinn y Claus Mettheck, crearon, dende la física mecánica, una nueva disciplina: la biomecánica del arboláu, que desplica cómo los árboles van xenerando les sos estructures y cómo reacionen dende un puntu de vista mecánicu.

Per otra parte, hai que reseñar el trabayu de Watson (nel Morton Arboretum de Chicago) en rellación col desarrollu del sistema radicular de los árboles, asuntu principal nel arboláu urbano, sobre manera del arboláu n'alcorque onde la escasez d'espaciu vital y la compautación son una torga extraordinaria pal desarrollu correutu de los exemplares.

Per otru llau, el material vexetal que se podía alquirit hasta bien entraos los años noventa yera de mui baxa calidá. La posibilidá de consiguir árboles nos grandes viveros italianos, belgues y holandeses permitió plantalos d'una manera bien estructurada y con un sistema radicular razonable pa que les sos copes crezan de manera paecida a como lo fadríen na naturaleza, o como correspondería a los estándares de crecimentu de la especie. L'árbol ye perimportante nes ciudaes, pola capacidá que tien de depurar l'aire urbano contaminao y dar solombra nesos espacios urbanos duros.

Nos años noventa y nos dos mil, desarrolláronse planes d'ordenación en toles ciudaes que cambien, de dalguna manera, los estándares anteriores. Proyéutense urbanizaciones nes qu'apaecen aveníes con dalgo d'entidá y nes que les zones verdes tienen una presencia mayor que nos modelos d'urbanizaciones anteriores y zones de cases con dalgunes zones verdes na redolada. Por embargu, estos desarrollos urbanísticos (con dalguna esceición) nun son mui relevantes na so conceición y, aunque haya dalgún

cambéu, queden lloñe de lo que podríamos nomar estándares europeos.

Les zones verdes de les ciudaes tienen encomendaes distintes funciones. Per una parte, tienen la misión d'aguapales, de xenerar un espaciu qu'atraiga; y, nesi sentíu, hai que dicir que son un exemplu perfeutu repartidor de bientar, yá qu'ufierten accesu llibre pa toles persones, ensin importar la clas nin la condición. La ciudadanía tien derechu a la guapura y a esfrutar d'unos espacios qu'ambientalmente-y dean beneficios. Sin embargu, el modelu de zones verdes foi camudando col tiempu y evolucionó de manera distinta nes diferentes ciudaes del mundu, y tamién nes asturianas.

El modelu estándar podemos representalu como zones de pradería, a lo menos na zona atlántica. Sicasí, na zona más continental y mediterránea, les estayes de prau, conocíes como *césped*, son un oxetu del deséu que s'implanta prácticamente en toles ciudaes españolas, magar que nun sen medioambiental nun seyan la solución ideal por ser grandes consumidores d'agua.

Ún de los factores importantes qu'hai que considerar na variable ye'l modelu de movididá porque va condicionar la estructura de los viales de los espacios públicos, sobre too teniendo en cuenta que los vehículos particulares son unos consumidores grandes d'espaciu, tanto cuando se desplacen como nel aparcamientu en superficie.

LOS CAMBEOS DE LOS AÑOS 70....

Nesti sen, munches ciudaes europees que teníen un puntu de partida muncho meyor que les ciudaes españolas —demasiado denses y con unos modelos de cai del tipu de los desplicaos enantes— entamaron nos años setenta cambeos nos modelos de movididá que favorecíen la lliberación d'espacios pa introducir elementos verdes

La naturalización urbana ayuda a suavizar el cambéu climáticu al menguar la güelga de carbonu de la ciudá. Meyora la calidá del aire y del agua, proporciona hábitats pa la vida xabaz y ufierta espacios recreativos y afayadizos pa los habitantes.

qu'amenorguen la dureza de les ciudaes, amás de xenerar unos modelos más eficientes dende'l puntu de vista de la movilidad urbana y, de xuru, con una menor incidencia de contaminación y de consumu enerxéticu.

Ente les ciudaes españoles, Vitoria-Gasteiz ye referente como casu d'éxitu pola solución urbanística qu'iguaren, onde s'incorporen espacios llibres bien grandes nel cinturón ambiental, con una naturaleza qu'entá siendo domesticada, s'aproxima a lo xabaz, y en tou casu, con unes zones verdes que siguen un modelu mui diferente en consumu enerxéticu y costes de caltenimientu. Ye una ciudá con un modelu de movilidad basáu na peatonalización y na movilidad en bicicleta, pero tamién con estremaos transportes públicos que reducen l'usu del vehículu particular, gran consumidor d'espaciu, como se comentó.

Con esceiciones como esta, atopamos ciudaes con un modelu escesivamente basáu nel consumu d'agua y d'enerxía pal caltenimientu de praos y l'usu d'elementos de xardinería clásica como plantes de temporada, arbustos de flor y, de xuru, tamién árboles. Sicasí, les urbanizaciones nueves, al tener más espaciu, planteguen la posibilidá de que los árboles puean algamar un desarrollu mayor. Por embargu, l'espaciu duru sigue dominando como modelu d'urbanización basáu na impermeabilización del suelu, na recoyida de les corrientes d'agua de lluvia y el so unviu a les correspondientes depuradores pa proceder al procesamientu, col costu enerxéticu qu'esto supón.

...Y DE LOS 90: NATURALIZACIÓN URBANA

Pero los cambeos nel modelu d'urbanización del espaciu públicu entamaron realmente con fuerza nos años noventa, cuando se reflexonó sobre

distintos aspectos que pretenden un cambéu de modelu d'espacios llibres; fálase d'ún nel que la ciudá se tresforme pa meyorar la calidá de vida de la ciudadanía menguando los impautos ambientales y los costos enerxéticos y de recursos naturales. El cambéu necesariu nes ciudaes xenera la necesidá d'incorporar el conceutu de **naturalización urbana**, ye dicir, el procesu pol que s'incorporen elementos naturales n'entornos urbanos pa meyorar la calidá de vida, promover la biodiversidá y amenorgar los efeutos del cambéu climáticu. Esto pue incluir la creación de parques, techos verdes (vexetales) y la conservación de les árees verdes existentes dentro de les ciudaes.

Les soluciones basaes na naturaleza son enfoques que s'inspiren na naturaleza y la usen p'abordar los desafíos ambientales y sociales. Exemplos d'esto incluyen la restauración de manglares pa la proteición contra tormentes, la sustitución de canales artificiales por calces fluviales, la creación de xardinos de lluvia pa xestionar l'agua de lluvia y l'usu de vexetación p'amenorgar la temperatura urbana. Estes soluciones son sostenibles y puen dar entovía más beneficios como la meyoría del bientar humanu y la biodiversidá.

La naturalización urbana ye un enfoque de diseñu y planificación de ciudaes que busca integrar elementos naturales y procesos ecolóxicos n'entornos urbanos. L'oxetivu ye crear espacios más caltenibles, resilientes y habitables al reintroducir la naturaleza n'árees urbanizaes. Esto pue incluir una variedá d'estratexes y práutiques como:

1. **Parques y árees verdes:** crear o restaurar parques, xardinos comunitarios y techos verdes qu'aumenten la vexetación na ciu-

dá. Ye necesario aumentar la diversidá vexetal recuperando especies xabaces, too ello ensin sacrificar aspectos estéticos. Nun hai qu'escaecer la importancia del suelu, base d'una gran actividá biolóxica: han manexase los suelos de forma que recuperen l'actividá fúnxica y microbiana, base de la cadena trófica del suelu.

2. **Corredores ecolóxicos:** iguar redes d'espacios verdes coneutaos que faciliten el movimientu de la fauna y la flora, ameyorando la biodiversidá urbana.
3. **Xestión del agua:** complementar soluciones de xestión d'agües pluviales, como xardinos de lluvia, güelgues urbanes y sistemas de drenaxe, qu'ayuden a amenorgar inundaciones y meyorar la calidá del agua. Incorporación de suelos estructurales que faciliten el desarrollu del sistema radicular del arboláu viario a la vez qu'aumenten la permeabilidá de les corrientes d'agua de lluvia. Ún de los máximos esponentes ye'l llamáu «Sistema Estocolmu de Plantación d'Arboláu» (Ficha del entamu l'artículu).
4. **Agricultura urbana:** fomentar l'agricultura urbana al traviés de güertos urbanos y proyectos de cultivu n'espacios urbanos disponibles, lo que tamién pue meyorar la seguridá alimentaria y la cohesión comunitaria.
5. **Infraestructura verde:** integrar infraestructures verdes, como pavimientos permeables y biorretenciones, que trabayen n'armonía colos procesos naturales pa xestionar l'agua y reducir l'efeutu islla de calor.

Los beneficios de la naturalización urbana son múltiples: ayuda a suavizar el cambéu climáticu al menguar la güelga de carbonu de



ARRIBA

Figures 3 y 4. Trabajos de naturalización na cai Alejandro Farnesio (La Calzada) enantes y dempués de la intervención.



ABAXO

Figura 5. Xardín de lluvia nel Parque fluvial de Viesques.

la ciudá, meyora la calidá del aire y del agua, proporciona hábitats pa la vida xabaz y ufierta espacios recreativos y afayadizos pa los habitantes. Amás, pue aumentar el valir estéticu y económicu de les árees urbanes, promoviendo una meyor calidá de vida pa la xente que vive nelles.

DELLOS EXEMPLOS DE XIXÓN

Na Casa Conceyu de Xixón, la primer corporación democrática, cola creación de la Conceyalía de Medioambiente, fai la primer plantación mínimamente planificada d'arboláu viario. Pero la configuración (descrita enantes) de les cais y de los espacios públicos dexaba per poca su-



perficie y poco espaciu pa la plantación de pocos árboles que pudieren apurrir unos beneficios ecosistémicos mínimos. Alcorques de 50 x 50 cm nunes aceres que yeren mui estreches, obligaben a la eleición d'árboles de porte pequeño, mayormente inxertaos. Especies como l'acacia, el sanxuanín podáu en copa o la llamera inxertada yeren, fundamentalmente, les especies seleccionaes pa la plantación.

////////////////////

ABAXO

Figura 6. Obres de demolición del azud nel proyeutu de naturalización d'El Ríu Piles.

ABAXO IZQUIERDA

Figura 7. Naturalización cola creación de miniviesques, pel métodu Miyawaki, nel Parque fluvial de Viesques.



Yá nel sieglu nel que tamos, y acordies coles tendencias urbanístiques de finales del XX enantes comentaes, acometiéronse en Xixón proyeutos más ambiciosos y anovadores, como la naturalización de l'avenida d'El Molinón (Figures 1 y 2) o de la cai Alejandro Farnesio, en La Calzada (Figures 3 y 4).

La naturalización implica tamién una bona xestión de l'agua, mesmo na previsión d'inundaciones (Figura 5) como na eliminación d'artificialización (Figura 6) o la renaturalización de zones como Viesques (Figura 7). El Sistema Estocolmu ye perfeutu pa la plantación más favoratible d'arboláu viario (Figures 8 y 9).

////////////////////

DERECHA

Figures 8 y 9. Trabayos n'execución col Sistema Estocolmu de plantación d'arboláu, pente medies de suelos estructurales compatibles con infraestructuras urbanes.



¡Conviértete en ciudadano científico!

Gracias a la observación de los líquenes urbanos por los participantes y a la ayuda de los expertos, vamos a poder conocer el grado de contaminación al que los ciudadanos estamos expuestos.



Los líquenes urbanos como herramienta para la reflexión educativa al rodio de la calidad del aire en nuestra ciudad. Un ensayo en Uviéu

Por **Antonio Torralba-Burrial**

Departamentu de Ciencies de la Educación
Institutu de Recursos Naturales y Ordenación del Territoriu (Indurot)
Universidá d'Uviéu

Eduardo Cires

Departamentu de Biología d'Organismos y Sistemes (Botánica)
Institutu de Recursos Naturales y Ordenación del Territoriu (Indurot)
Universidá d'Uviéu

Sergio Pérez-Ortega

Departamentu de Micoloxía
Real Xardín Botánicu de Madrid
Conseyu Superior d'Investigaciones Científiques (CSIC)

LA CALIDAD DEL AIRE, ELEMENTU D'ESMOLICIÓN AMBIENTAL NES CIUDAES

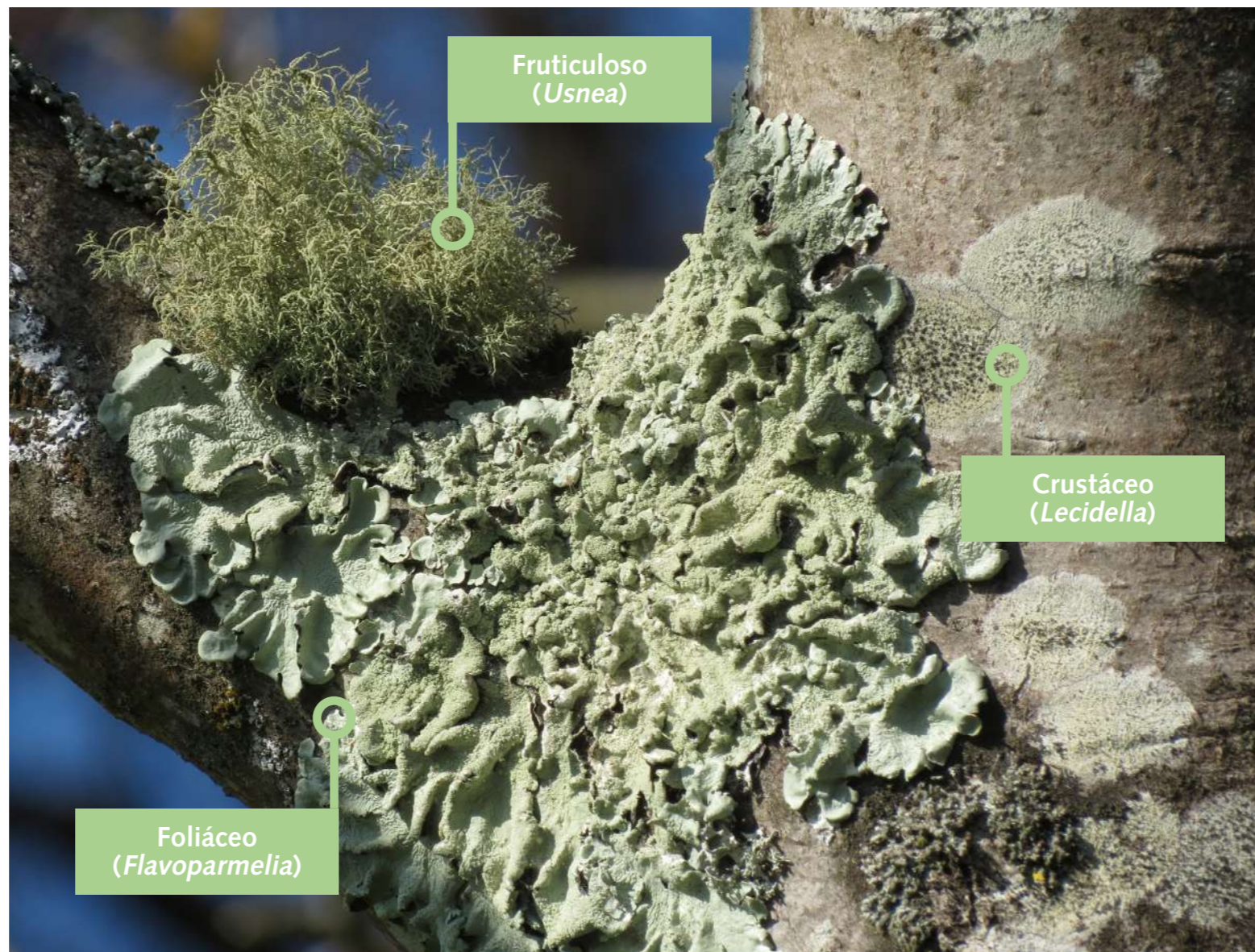
La esposición a la contaminación atmosférica ambiental asóciase con una medra importante na morbilidad y mortalidá (Cohen *et al.*, 2017). Cierto ye que n'Europa hubo una reducción importante d'emisiones nes ciudaes no que llevamos de sieglu, algamando valores compatibles colos niveles de regulación europeos d'anguaño, pero no referente a les partícules de tamañu pequeñu (PM_{2,5}), anguaño, más del 40 % de les estaciones de midida n'Europa nun algamen les llendes que deberíen tener en 2030, y namás un 8 % cumple coles llendes actuales de la OMS pa la proteición de la salú humana (EEA, 2025). Esti amenorgamientu nos niveles permitíos de contaminantes atmosféricos xeneró una disminución na contaminación qu'implica una reducción del númeru de muertes estimaes venceyaes a la respiración d'esas partícules na población urbana europea (Sicard *et al.*, 2021), aunque siguen representando una mortalidá prematura añal pa más d'un quartu de millón de persones na Xunión Europea (EEA, 2023).

Los episodios de contaminación atmosférica elevada recurrentes en nuestras ciudades también generen un sentimiento de preocupación social por la situación y el tema (Grossberndt *et al.*, 2021). En este marco, poder contribuir al estudio de la calidad del aire, poder conocer de primera mano los datos, cómo recogerlos y analizarlos, cómo hacer ciencia con ellos, pueden representar factores que motiven a la sociedad en general —y al alumnado y comunidad educativa en particular— a interesarse por proyectos de **ciencia ciudadana** que los empueren y-yos permitan ser parte activa de este conocimiento. De hecho, plantegáse que esas posibilidades conviertan la ciencia ciudadana en una herramienta innovadora y potencialmente muy útil para facilitar la motivación y el aprendizaje de la ciencia tanto en entornos formales como informales (Torralba-Burrial, 2021).

LIQUES Y CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Los líquenes, el fenotipo simbiótico de hongos que cultivan algas (Lücking *et al.*, 2021), resultan muy adecuados para valorar contaminantes del aire extremos, existiendo especies más sensibles y otras más tolerantes a la contaminación, lo que permite crear escalas de sensibilidad que indiquen el nivel de contaminación ambiental. Pueden rastreadse propuestas para su uso como indicadores ya desde el siglo XIX (Nimis *et al.*, 2002), aunque la estandarización ya algo más reciente. De las veces, la propia estructura del líquen puede dar una idea superficial de la sensibilidad, siendo en general más sensibles a la contaminación los líquenes fruticulosos (los que tienen una estructura que nos recuerda a un arbusto pequeño) que los crustáceos (los que forman una costra encima de la superficie a la que crecen), teniendo los foliáceos una sensibili-

El proyecto LiquenCity-2 anima a convertirse en ciudadanos científicos, ya que a través de la observación de líquenes urbanos podemos estimar el grado de contaminación al que estamos expuestos en nuestras casas y entornos escolares.



ABAXO

Figura 1. Según la estructura del soporte, los líquenes pueden ser fruticulosos, foliáceos o crustáceos. Semeya de A. Torralba.

dad intermedia (tal vez parezca a una hiedra) (Figura 1). Pero, como vamos a ver más adelante, las diferencias de sensibilidad entre especies en realidad sobrepasan con mucho esa clasificación tan simple. En otros países, también se echaron a andar proyectos de ciencia ciudadana con éxito (Abas, 2021; Thakur *et al.*, 2024), muy especialmente en el Reino Unido (Welden *et al.*, 2018), donde ya había manuales para aficionados a finales del siglo pasado (Richardson, 1992).

Teniendo en cuenta la dificultad de identificación de muchas especies para la persona no especialista, entienda que no es fácil pasar de un análisis hecho por un lichenólogo experto a otro en el que intervenga la ciudadanía en general y, inclusive, el alumnado, años de ese conocimiento profesional. El análisis de esas experiencias previas permite extraer algunas conclusiones útiles de cara a mejorar la implementación de esos proyectos con ciudadanía implicada. Por una parte, la identificación a partir de imágenes de un número amplio de especies de líquenes no resulta posible, generando sesgos, especialmente cuando implica a no especialistas (Counoy *et al.*, 2023; Munzi, Isocrono & Ravera, 2023). Por la otra, el uso de un número reducido de especies, estandarizado ya implicando de ellas que se puedan localizar y identificar con facilidad, además de contar con la confirmación de especialistas, puede hacerse con éxito (Munzi, Isocrono & Ravera, 2023).

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO LIQUENCITY-2 EN UVIÉU

El proyecto *LiquenCity-2* (<http://www.liquencyty2.org/>) es un proyecto de ciencia ciudadana escolar en el que la comunidad educativa emplea los líquenes urbanos como indicadores de la calidad del aire de los barrios y ciudades (ver semeya de portada del artículo). Financiada por la

Tolerantes



Xanthoria parietina



Physcia adscendens



Hyperphyscia adglutinata

Intermedios



Flavoparmelia caperata



Melanelixia subaurifera



Punctelia subrudecta

Más sensibles



Parmelia sulcata



Parmotrema sp.



Ramalina farinacea

IZQUIERDA

Figura 2. Les nueve especies de líquenes escoyíos en ciudá d'Uviéu pa poner en práutica el proyeutu LiquenCity-2, pola so relativa facilidá d'identificación, calter llamaderu y sensibilidá diferencial a la contaminación. D'izquierda a derecha y d'arriba a abaxo: líquenes d'alta tolerancia a la contaminación: *Xanthoria parietina*, *Physcia adscendens* y *Hyperphyscia adglutinata*; líquenes de tolerancia intermedia a la contaminación: *Flavoparmelia caperata*, *Melanelixia subaurifera* y *Punctelia subrudecta*, y líquenes con muncha sensibilidá a la contaminación: *Parmelia sulcata*, *Parmotrema sp.* y *Ramalina farinacea*.

Semeyes de *Hyperphyscia adglutinata* y *Ramalina farinacea* feches por Sergio Pérez-Ortega. El restu tán feches por Antonio Torralba-Burrial.

Fundación Española pa la Ciencia y la Teunoloxía (FECYT) y dirixíu pol Real Xardín Botánicu de Madrid (CSIC), participa nel la seición española del Sistema Global d'Información sobre Biodiversidá (GBIF), cuatro universidaes (Barcelona, Navarra, Uviéu y Vigo), l'Institutu de Ciencies del Mar (ICM-CSIC) y l'asociación Terrabiota. Ye una segunda parte del proyeutu de ciencia ciudadana LiquenCity, que se sacó alantre con escelentes resultaos de participación de la comunidá educativa en Madrid y Barcelona (Berlinches de Gea & Pérez-Ortega, 2020).

En *LiquenCity-2* plantegóse ampliar la metodoloxía pa poder incorporar tres ciudaes de tamañu medianu (Uviéu, Pamplona y Pontevedra) con una mayor autonomía de la ciudadanía participante, n'especial centros educativos, y la redución de les especies a valorar a les que pudieran identificase al traviés de semeyes con meyores garantías d'éxitu y presentarán estremaes sensibilidaes a la calidad del aire.

Nel casu d'Uviéu, seleicionáronse nueve especies de líquenes epífitos, que crecen sobre los árboles urbanos, que resulten relativamente senciellos d'identificar y que presenten tres niveles distintos de tolerancia a la contaminación del aire (tres líquenes seleicionaos por cada nivel): alta, media y baxa (Figura 2).

Ente les especies más tolerantes a la contaminación, probablemente la que resulte más llamadera visualmente ye *Xanthoria parietina*, un líquen foliaceu con colores mariellos, mariellos anaranxaos o averdosaos, según la humedad qu'heba cuando lu observemos y el nivel d'esposición al sol nel que s'alcuentre, y sobre'l que destaquen les sos estructures reproductores (apotecios) más o menos circulares. Resulta mui común nes ciudaes asturianas, pudiendo vivir non solo sobre árboles, sinón tamién en bancos, muros ya inclusive estructures de plásticu.

Physcia adscendens ye un líquen foliaceu de menor tamañu, d'un color grisáceo, gris azuláu o gris verdoso, con unos talos que tienen forma de llóbulos pequeños o fueyines estreches y ramificaes, con unos pelinos (cilios) nos bordes. En dalgunos llóbulos presenten unes estructures abultaes de reproducción vexetativa (soralios) en forma de cascu. Pue confundise con otre especies del so mesmu xéneru pero que tamién presenten una tolerancia alta a la contaminación.

Hyperphyscia adglutinata ye'l tercer líquen seleicionáu ente los más tolerantes a la contaminación. Foliaceu pero escasamente separtáu del substratu, presenta un color grisáceo más averdoso que l'anterior y llega cubrir árees amplies de los tueros de los árboles al esparde se conxuntamente numerosos talos, dando-y un aspeutu granosu a la corteza. Presenta estructures de reproducción vexetativa (soralios) circulares nel mediu de los llóbulos, de color distintu al del restu del talu.

Les tres especies seleccionaes pola so sensibilidad media a la contaminación presenten talos foliaceos más grandes. *Flavoparmelia caperata* ye de color verde (verde claro, verde amarellao, verde grisáceo), coles partes centrales d'aspeutu espolvoriáu (los soralios) y les partes llises más perifériques del talu, lo que la estrema mui bien d'otres especies foliacees presentes na ciudá.

Melanelixia subaurifera ye un líquen que, en tando secu, pue pasar relativamente desapercibíu sobre la corteza de los árboles por mor del so color pardu escuro, pero que se vuelve verde, inclusive verde brillante, cuando ta llentu dempués o mientres llueve, con un aspeutu mui diferente al restu de líquenes presentes. Tien soralios de color amarellao hasta marrón escuro en mediu del talu.

Punctelia subrudecta presenta talos amplios y de color gris hasta averdosao, con munchos puntinos blancos, lo que-y da nome al xéneru, y que faciliten la so identificación ente'l restu de los líquenes de talos foliaceos verdosos que viven na ciudá.

Pa les tres especies más sensibles a la contaminación escuyéronse dos foliacees y una fruticulosa. *Parmelia sulcata* presenta talos grisáceos con marques de llinies blanques, diferenciadores de la especie, perfectamente visibles a simple vista, o con un lente de pocu aumentu o la mesma cámara del móvil.

Parmotrema ye un xéneru que presenta talos con los llóbulos mui anchos, de color gris claro averdosao, llisos na cara superior, con bordes que puen ser más ablanquiaos ya hinchaos por cuenta de les estructures reproductores (soralios).

Ramalina farinacea ye un líquen fruticulosu, de color amarellao claro, conoció dacuando por presentar unos filamentos allargaos y estrechos (llacinies) que-y dan un aspeutu d'arbustu o

d'alga marina de tamaño pequeñu. Ye posible que dellos participantes nel proyeutu puean confundilu con otres especies fruticulosas, como les del xéneru *Usnea* (eses «barbes» llamatives que vemos colgar de les rames d'árboles en viesques poco alteriaes), pero que de fechu resulten entovía más sensibles a la contaminación y que, polo tanto, la so presencia nun camudaría esa clasificación planteada de tres niveles.

Pa facilitar el siguimientu de les aiciones de los ciudadanos científicos nel proyeutu y l'intercambéu d'información ente líquenólogos profesionales y esos ciudadanos, que podríen acceder en tiempu real a los datos que se recayeron nel proyeutu, xeneróse na plataforma *iNaturalist* un proyeutu propiu (*LiquenCity2 Oviedo*). Nel mesmu, los participantes teníen que xubir semeyes identificatives del árbol nel que s'atopaben los líquenes y, dempués, de cada especie de líquen presente (preferiblemente de les especies indicadores seleccionaes) con una indicación aproximada de la parte del tueru qu'ocupaba. Nun torgando tampoco que xubieren d'otros árboles, namás se consideraron los líquenes llocalizaos d'especies d'árboles ampliamente distribuyíos pela ciudá

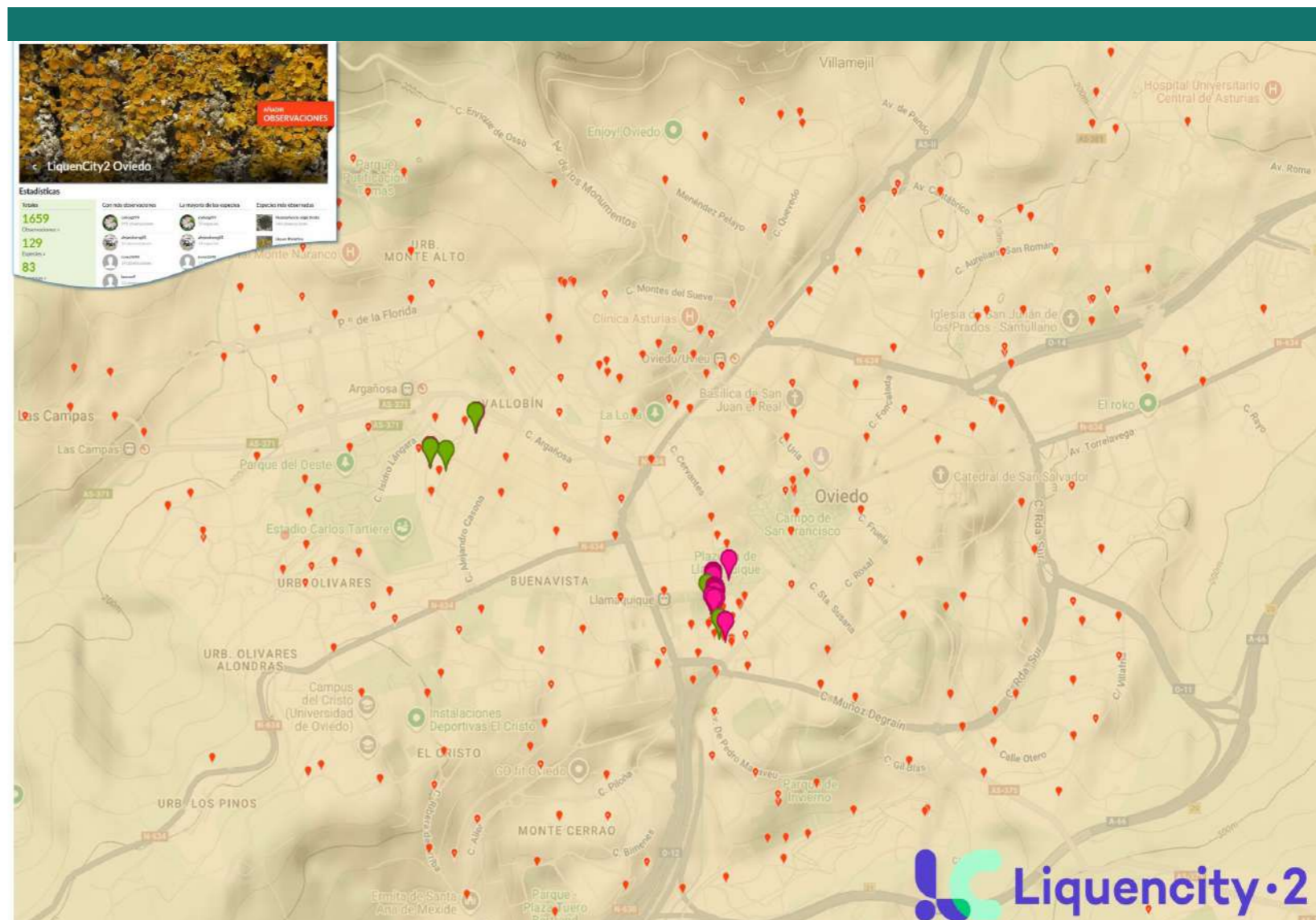
DERECHA

Figura 3. Nel proyeutu *LiquenCity-2* recopiláronse, hasta la fecha, más de 1.600 observaciones distribuyíes pela ciudá d'Uviéu.

d'Uviéu (ancines, plárganos, magnolios, tilares, sanxuaninos...) evitando les especies de cortejes más acedes (coníferes, ginkgos...) o que se desprenden con facilidá (plárganos de solombra, ocalitos...) y seleccionando, amás, exemplares de ciertu porte (diámetru del tueru mayor de 30 cm) pa evitar los que tuvieren tresplantaos de recién y que puedan presentar especies de líquenes que nun reflexen el nivel de contaminación de la zona. Pa facilitar el llabor, xeneráronse guíes con fiches

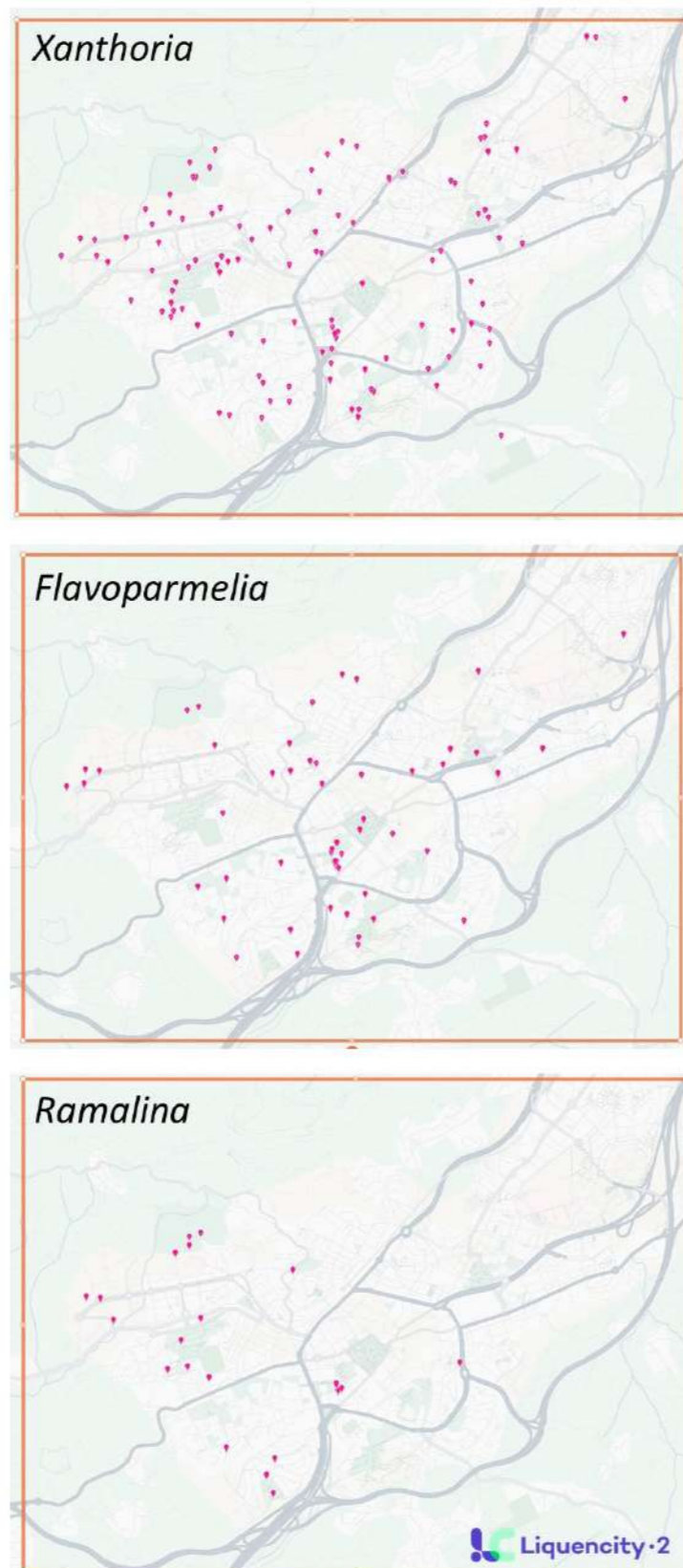
identificatives de los árboles urbanos y de los nueve líquenes epífitos a valorar (<https://liquencity2.org/>).

Ente 2020 y 2024 fixéronse seis ensayos concretos qu'implicaron alumnáu universitariu (futuros maestros, alumnáu veterano del programa pa mayores PUMUO, alumnáu de Biología), asina como en centros educativos n'aiciones d'educación non-formal (Nueche Europea de los y les investigadores), y ciudadanía en xeneral.



DERECHA

Figura 4. La distribución en ciudad de los distintos géneros de líquenes no es homogénea, sino que depende de la sensibilidad a la contaminación. D'arriba a abaxo obsérvase la mayor distribución de *Xanthoria*, más tolerante a la contaminación, mientras que van mermando las localizaciones de *Flavoparmelia* (tolerancia intermedia) y *Ramalina* (gran sensibilidad a la contaminación).



¿QUÉ NOS DICEN LOS LIQUENES UVIÉINOS SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE?

Hasta setiembre del 2025, el proyeutu xeneró 1.659 observaciones rexistraes (1.230 corresponden con líquenes y árboles con coordenadas en ciudad), implicando a 71 observadores y a 47 persones que proporcionaron dalguna identificación (Figura 3). Hasta teniendo en cuenta solo estos datos, queda clara la potencialidá pal emplegu de los líquenes a la hora de valorar la contaminación del aire en ciudad d'Uviéu. Asina, les especies de líquenes que más se vieron foron les tres más tolerantes a la contaminación (*H. adglutinata*, 144 vegaes; *X. parietina*, 116 vegaes; y *P. adscendens*, 107 vegaes), con unos valores que resulten notablemente superiores a los taxones más sensibles (*Parmelia*, 52 vegaes; *Parmotrema*, 20 vegaes; *Ramalina*, 25 vegaes).

Amás de la frecuencia d'apaición, tamién resulta d'interés la distribución espacial de les especies dientro de la contorna urbana (Figura 4). De fechu, los datos amuesen contrastes bultables ente les especies más tolerantes (como se pue ver nel mapa del xéneru *Xanthoria*) les de tolerancia intermedia (como *Flavoparmelia*) y les más sensibles (como *Ramalina*). Estes diferencies espereyen patrones ecolóxicos coherentes colos gradientes de calidá del aire: mentanto que *Xanthoria* apaez práuticamente distribuyida per tola ciudad, *Flavoparmelia* détéctase con menor frecuencia, y *Ramalina* ye muncho más escasa.

Nesti últimu casu, *Ramalina farinacea* paez ausente (o resultó más difícil de llocalizar) na redolada de les principales vías con tráficu intenso, onde la concentración de contaminantes ye d'esperar que seya más alta. Pela contra, atópase con mayor regularidá nes zones verdes amplies y con menos tráficu, como'l parque

Purificación Tomás, el parque del Oeste o les árees del campus universitariu de Llamaquique (Figures 5 y 6), llugares onde la calidá del aire paez más afayadiza pal so desarrollu o caltenimientu.

LLENDES Y PERSPEUTIVES

Magar los positivos resultaos algamaos hasta'l momentu, el proyeutu Liquency-2 en Uviéu presenta delles problemátiques propies del trabayu con líquenes de forma participativa. De mano, les derivaes del desconocimientu d'estes especies (o delles veces de la so propia presencia), amás de les dificultaes pa la so identificación, que faen que se perciban como un grupu complicáu pal alumnáu. En segundu llugar, derivaes del diseñu participativu y de la propia naturaleza de la información obtenida. La seleición d'un númeru reducíu d'especies bien diferenciables y de bon tamañu, onde les posibles confusiones queden nel mesmu nivel (altu) de sensibilidad a la contaminación ambiental, asina como l'ayuda de la intelixencia artificial, de l'aplicación y de les fichas creaes, xunto cola revisión posterior de les semeyes, permite amenorgar eses primeres torgues.

El sesgu nes zones onde se garraron muestres foi dalgo más difícil de reducir, yá qu'hubo zones mui visitaes polos participantes nel proyeutu (la rodiada de campus universitarios, por exemplu), mientras qu'otres apurren un númeru mui escasu de muestreos. Espérase compensar esta descompensación al traviés de muestres complementaries dirixíes a estes zones concretes con menor cantidá de datos.

Consiguir una mayor implicación de los centros educativos que se traduzan en datos más averaos a cada centru ye otru de los problemes importantes que torguen consiguir una reflexión afayadiza al rodio de la situación de la contorna de colexos ya institutos.



ARRIBA Y DERECHA

Figures 5, 6 y 7. Semeyes de participantes grandes y pequeños nel proyeutu d'indentificación de líquenes LiquenCity-2 na ciudá d'Uviéu: Parque de Pura Tomás y Campus Universitariu de Llamaquique. Semeyes d'A. Torralba.

Referencias bibliográficas

- Abas, A. (2021). A systematic review on biomonitoring using lichen as the biological indicator: A decade of practices, progress and challenges. *Ecological Indicators* 121, pp. 107-197. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107197>
- Berlinches de Gea, A. & Pérez-Ortega, S. (2020). Lliquency: Busca líquenes urbanitas y conoce la calidad del aire de tu ciudad. *Conservación Vegetal* 24, pp. 42-45.
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet* 389(10082), pp. 1907-1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Counoy, H., Turcati, L., Lorrilliere, R., Bénateau, S., Maalouf, J. P., Agnello, G., ... & Agnan, Y. (2023). Performance evaluation and applicability of Lichens GO, a citizen science-based protocol for urban air quality monitoring. *Ecological Indicators* 150, artículo 110269. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110269>
- EEA. (2023). *Harm to human health from air pollution in Europe: burden of disease 2023. Briefing no. 23/2023*. European Environment Agency. <https://doi.org/10.2800/721439>
- EEA. (2025). *Air Quality Status Report 2025*. European Environment Agency. <https://doi.org/10.2800/9895153>
- Grossberndt, S., Bartonova, A. & González Ortiz, A. (2021). *Public awareness and efforts to improve air quality in Europe*. Norway: European Topic Centre on Air pollution, transport, noise and industrial pollution.
- Löhmus, P., Degtjarenko, P., Lotman, S., Copoț, O., Rosenvald, R., & Löhmus, A. (2023). «Ready! Set! Lichen!»: a citizen-science campaign for lichens, against the odds of success. *Biodiversity and Conservation* 32(14), pp. 4753-4765. <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02724-6>
- Lücking, R., Leavitt, S. D., & Hawksworth, D. L. (2021). Species in lichen-forming fungi: balancing between conceptual and practical considerations, and between phenotype and phylogenomics. *Fungal Diversity* 109(1), pp. 99-154. <https://doi.org/10.1007/s13225-021-00477-7>
- Munzi, S., Isocrono, D., & Ravera, S. (2023). Can we trust iNaturalist in lichenology? Evaluating the effectiveness and reliability of artificial intelligence in lichen identification. *The Lichenologist* 55(5), pp. 193-201. <https://doi.org/10.1017/S0024282923000403>
- Nimis, P. L., Scheidegger, C., & Wolseley, P. A. (eds.). (2002). *Monitoring with lichens-monitoring lichens*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7>
- Richardson, D.H.S., (1992). *Pollution monitoring with lichens*. Naturalist' Handbooks 19. Slough: The Richmong Publishing Co.
- Sicard, P., Agathokleous, E., De Marco, A., Paoletti, E., & Calatayud, V. (2021). Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades. *Environmental Sciences Europe* 33(1), p. 28. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00450-2>
- Thakur, M., Bhardwaj, S., Kumar, V., & Rodrigo-Comino, J. (2024). Lichens as effective bioindicators for monitoring environmental changes: a comprehensive review. *Total Environment Advances* 9, artículo 200085. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200085>
- Torralba-Burrial, A. (2021). La ciencia ciudadana como innovación en la enseñanza de las ciencias. En Fueyo-Guérrez, M. A. (Ed.). *XII Jornadas de Innovación Docente 2019. Libro de Actas*, pp. 429-441. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Torralba-Burrial, A. (2023) Acercando problemática ambiental y biodiversidad urbana a escolares de-primaria a través del aprendizaje lúdico virtual. N'Al Allueva Pinilla & JL Alejandro Marco (coord.) *Innovaciones tecnológicas para la enseñanza superior: contribuciones y resultados*, pp. 179-186. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Welden, N. A., Wolseley, P. A., & Ashmore, M. R. (2018). Citizen science identifies the effects of nitrogen deposition, climate and tree species on epiphytic lichens across the UK. *Environmental Pollution* 232, pp. 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.020>

Ciencias



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



ACADEMIA
DE LA LLINGUA
ASTURIANA
