

Informe

**MONITORIZACIÓN Y ENSAYOS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES
INTERIORES ACTUALES DEL EDIFICIO DEL MUSEO DE NAVARRA**

SAVIArquitectura. Universidad de Navarra

20 de diciembre de 2019
Mod. 29 de septiembre de 2020

INDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO
2. CONTEXTO Y ANTECEDENTES
 - 2.1. NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES EN MUSEOS
 - 2.2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y DEL SISTEMA DE CONTROL AMBIENTAL DEL MUSEO DE NAVARRA
 - 2.2.1. Características generales del MN
 - 2.2.2. Características constructivas (fachadas y cubiertas)
 - 2.2.3. Sistemas actuales de acondicionamiento higrotérmico y control del MN
 - 2.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE PAMPLONA
3. METODOLOGÍA
 - 3.1. MONITORIZACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES
 - 3.2. ENCUESTAS. EVALUACIÓN DEL AMBIENTE INTERIOR
 - 3.2.1. Visitantes
 - 3.2.2. Trabajadores
 - 3.3. OTROS ENSAYOS: PUERTA VENTILADOR, TERMOGRAFÍA, Y DE FLUJO TÉRMICO)
4. RESULTADOS. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LOS MESES DE VERANO
 - 4.1. EVALUACIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES DEL ESPACIO EXPOSITIVO
 - 4.1.1. Temperaturas
 - 4.1.2. Humedad relativa
 - 4.1.3. Concentración de CO₂
 - 4.2. EVALUACIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES DE LAS ZONAS DE OFICINAS
 - 4.3. ENCUESTAS
 - 4.3.1. Visitantes
 - 4.3.2. Trabajadores
 - 4.4. EVALUACIÓN DE OTROS PARÁMETROS
 - 4.4.1. Campaña 1. Trípode 1 en sala de planta 1ª y en orientación oeste
 - 4.4.2. Campaña 2. Trípode en sala de temporales en planta baja
5. RESULTADOS. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LOS MESES DE INVIERNO
 - 5.1. EVALUACIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES DEL ESPACIO EXPOSITIVO
 - 5.1.1. Temperaturas
 - 5.1.2. Humedad relativa
 - 5.1.3. Concentración de CO₂
 - 5.2. EVALUACIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES DE LAS ZONAS DE OFICINAS
 - 5.3. ENCUESTAS
 - 5.4. EVALUACIÓN DE OTROS PARÁMETROS

- 5.5. ENSAYO DE TERMOGRAFÍA
- 5.6. ENSAYOS DE PUERTA VENTILADOR
- 5.7. ENSAYOS DE FLUJO TÉRMICO
- 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

MONITORIZACIÓN Y ENSAYOS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES ACTUALES DEL EDIFICIO DEL MUSEO DE NAVARRA

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO

Como fruto del contrato entre Museo de Navarra (en adelante MN) y SAVIArquitectura de la Universidad de Navarra, para la “Monitorización y ensayos de las condiciones ambientales interiores del edificio del Museo de Navarra”, se presenta este Informe, cuyo objeto es conocer el estado actual del edificio del MN desde el punto de vista higrotérmico y energético. Desde este conocimiento, así mismo poder basar propuestas de mejora para la eficiencia energética del edificio y la mejora del confort de los visitantes y los trabajadores del MN. Previo a este informe final, se realizó un primer informe en julio de 2019.

El estudio de la eficiencia energética del edificio debe considerar no sólo los objetivos de reducir la demanda y el consumo energético del edificio atendiendo al bienestar de los usuarios, sino también a la conservación de las colecciones expuestas y en depósito, debido al uso singular de museo. Éstas requieren unas condiciones higrotérmicas muy estables, y unas limitaciones máximas y mínimas principalmente en humedad relativa y temperatura. Estas condiciones deben estudiarse para todo el año en la localidad de Pamplona, donde se encuentra localizado el MN, teniendo en cuenta las condiciones tan distintas que se dan especialmente en invierno y en verano, por lo que el estudio debe abarcar esos momentos característicos.

Desde 1956, el Museo de Navarra tiene su sede en el antiguo Hospital de Nuestra Señora de la Misericordia de Pamplona, datado del siglo XVI, que se localiza junto a las murallas en el extremo noroeste del casco antiguo. En 1990 este edificio fue remodelado y rehabilitado de forma integral. Esta remodelación de los años 90 no planteó la instalación de un sistema mecánico de ventilación y renovación de aire, con lo que ésta se realiza manualmente mediante la apertura de ventanas en momentos puntuales. El MN tiene un sistema de calefacción compuesto de dos calderas de gasoil y radiadores tradicionales. No tiene sistema de aire acondicionado más que en zonas concretas del museo y de las oficinas, junto con humidificadores/deshumidificadores, y ventiladores puntuales. Las altas exigencias actuales para la conservación de las obras de patrimonio hacen insuficientes e ineficaces estos sistemas.

El proyecto se ha llevado a cabo por el grupo de investigación SAVIArquitectura de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Navarra, dirigido por Ana Sánchez-Ostiz. El proyecto de investigación ha estado dirigido por Aurora Monge, y los profesores e investigadores que han participado en el proyecto han sido: Ana Sánchez-Ostiz, Jorge San Miguel, Ainhoa Arriazu y Purificación González.

Los objetivos específicos del presente informe son:

- Monitorizar las condiciones ambientales interiores del Museo de Navarra.

- Evaluar el alcance de los sobrecalentamientos en el MN en condiciones de verano, puesto que no dispone de sistemas generales de aire acondicionado ni de ventilación mecánica, así como de otras limitaciones relacionadas con la necesaria estabilidad térmica e higrotérmica requerido en estos tipos de edificios.
- Evaluar las condiciones higrotérmicas en condiciones de invierno y en relación a las características del edificio, a los sistemas actuales de calefacción, y a las necesidades específicas de los museos, principalmente: datos de condiciones ambientales térmicas e higrotérmicas, y ensayos de otros parámetros como la transmitancia térmica de las fachadas, evaluación de la estanqueidad al aire y puentes térmicos.
- Tener datos concretos del edificio con los que poder calibrar una futura simulación energética que dé lugar a un estudio fidedigno del alcance de las posibles medidas de rehabilitación que se planteen, que pueda basarse en aprovechar al máximo el potencial de las medidas pasivas del edificio y de la envolvente, para poder reducir la demanda energética necesaria para cubrir las exigencias y requerimientos de un museo en la actualidad. El objetivo final de estos trabajos es que sirvan de apoyo para un futuro pliego de condiciones de proyecto de rehabilitación integral del MN.

Por ello, el presente informe consta de los siguientes apartados:

- **Contexto y antecedentes:** donde se recogerán las normativas y recomendaciones generales sobre condiciones ambientales para los museos, así como la descripción de las características morfológicas, constructivas y los sistemas de acondicionamiento del edificio MN. También se recoge la descripción del clima de Pamplona.
- Descripción de la **metodología** de los trabajos de monitorización de condiciones ambientales, encuestas de evaluación del ambiente interior (visitantes y trabajadores), y otros ensayos realizados (termografía, ensayo de puerta ventilador, y ensayo de flujo térmico), para conocer el funcionamiento del edificio en condiciones reales durante el año 2019, en las que puedan basarse futuras actuaciones de rehabilitación del edificio.
- Resultados del estudio en **condiciones de verano**, distinguiendo entre las zonas expositivas y las zonas de oficinas por sus distintas exigencias de las condiciones ambientales principalmente higrotérmicas. Por periodos, se exponen los resultados obtenidos en base a las limitaciones del uso específico, especialmente el alcance de los sobrecalentamientos y de la falta de estabilidad higrotérmica requerida para la conservación de las colecciones. Se basa en los resultados de monitorización de temperatura, humedad relativa y concentración de ppm de CO₂, y en encuestas de satisfacción a visitantes y trabajadores, realizados entre junio y septiembre de 2019. Análisis y conclusiones de los resultados.
- Resultados del estudio en **condiciones de invierno**, distinguiendo igualmente entre zona expositiva y oficinas. Se expondrán los resultados obtenidos en base al estudio de su estabilidad higrotérmica y de las condiciones fuera de las limitaciones máximas y mínimas requeridas. Se basará en los resultados de monitorización realizados durante los meses de noviembre y diciembre de 2019. Además, se expondrán los resultados de otros ensayos de caracterización del edificio para el estudio de la eficiencia energética, como son los ensayos de estanqueidad al aire (puerta ventilador), los ensayos de termografía (para detectar principalmente puentes térmicos e infiltraciones al aire), y

- los ensayos de flujo térmico (para conocer la transmitancia de los muros en condiciones reales). Análisis y conclusiones de los resultados.
- Conclusiones y recomendaciones generales.

2. CONTEXTO Y ANTECEDENTES

2.1. NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES EN MUSEOS

Las exigencias en relación a las condiciones ambientales interiores en un edificio con uso de museo, deben responder a los requerimientos de conservación de las colecciones y al bienestar de las personas. Según el documento CP-0921 del Ministerio de Cultura español [1], en el control de las condiciones ambientales de los museos deberán tenerse en cuenta ambos requerimientos, de modo que no se deben supeditar los requerimientos de conservación de los objetos a la comodidad de las personas, sino hacerlas compatibles.

El citado documento CP-0921, establece unos parámetros que son compatibles con la normativa española y europea para los lugares de trabajo. En un museo, hay que tener en cuenta que hay dos tipos principales de uso por parte de las personas: trabajadores del museo (trabajadores de sala, vigilancia, oficinas, etc.) que están en el edificio toda una jornada laboral; y la de los visitantes que están un corto espacio de tiempo (horas) en el edificio.

El parámetro fundamental en la calidad del aire interior para la conservación de las obras de arte es la estabilidad de la **humedad relativa**. Los sistemas de acondicionamiento, parciales (fijos o portátiles) o centralizados, deberían garantizar (según CP-0921):

- para el **ciclo diario, una oscilación máxima de $\pm 5-10\%$** .
- para las fluctuaciones estacionales, a lo largo del ciclo anual, las oscilaciones no deben superar el 20%, **dentro del rango de 30-70%**.

El otro parámetro fundamental es el de la **temperatura** interior. Los sistemas deben garantizar (según CP-0921):

- para el **ciclo diario, oscilación máxima de $\pm 2-5^{\circ}\text{C}$** .
- para todo el año, que ésta se encuentre entre **17-27°C**.

Los objetos expuestos y almacenados con materiales especialmente vulnerables o con un estado de conservación crítico que necesitan un control más restrictivo, deben colocarse en vitrinas o sub-contenedores apropiados, acondicionadas con las condiciones adecuadas a dichos objetos.

Por otro lado, para edificios de oficinas que no cuentan con sistemas de acondicionamiento mecánico **en condiciones de verano**, se pueden estudiar los sobrecalentamientos interiores en relación a la aproximación adaptativa, que se dan cuando se superan unos límites de temperatura que están relacionados con la temperatura exterior (y por lo tanto, no son fijas y cambian según la temperatura exterior, ponderando las temperaturas medias exteriores de los siete días anteriores), y tienen en cuenta la capacidad adaptativa de las personas y los edificios

a condiciones más cálidas. Esta aproximación está recogida en la norma europea UNE EN 15251:2007 [2], que es muy similar a la americana ASHRAE55:2017.

Aunque estas limitaciones de temperatura no son directamente aplicables a las condiciones ambientales del museo, sí lo son para la zona de oficinas, y se tendrán en cuenta como temperaturas máximas y mínimas de modo orientativo (ver en las gráficas del apartado 4 como TopSUP y TopINF, temperatura operativa superior e inferior límites). Ésta se considera según la categoría de ambiente interior, relacionado con la expectativa del ocupante, de modo que los edificios nuevos y rehabilitados se consideran de Categoría II y los existentes de Categoría III. En los edificios nuevos y rehabilitados, las expectativas y el nivel de exigencia de los ocupantes, es mayor que en los edificios existentes, por lo que los umbrales superiores de temperatura para la consideración de sobrecalentamientos son más bajos en la Categoría II respecto a la Categoría III.

En **condiciones de invierno**, y puesto que el MN tiene un sistema de calefacción, las condiciones aceptables de temperatura se analizan según el RITE “Reglamento de las Instalaciones Térmicas de los Edificios” [3], en su Instrucción Técnica IT 1.1.4.1.2. Temperatura operativa y humedad relativa, se establecen los valores entre 21-23°C y humedad relativa 30-70% (por motivos energéticos, aunque se recomiende 40-50%), obtenidos según Fanger (metodología recogida en todas las normativas de confort para evaluación del ambiente térmico cuando hay sistemas mecánicos de acondicionamiento, como es la ya citada UNE EN15251).

Según esta última norma, en la tabla A3 “Temperaturas interiores recomendadas para cálculos energéticos”, para oficinas y espacios con actividades similares (oficinas individuales, oficinas diáfanas, salas de conferencias, auditorios, cafeterías, restaurantes, clases), se recomienda para invierno: 21-23°C para Categoría I, 20-24°C para Categoría II, y 19-25°C para Categoría III, (siendo Categoría I, la aplicable a un alto grado de expectativa, recomendado para espacios ocupados por personas débiles y sensibles con requisitos especiales, como disminuidos, enfermos, niños pequeños y ancianos). Como ejemplo, en grandes almacenes, con actividades de pie/en movimiento, las recomendaciones de temperatura bajan a 17,5-20,5°C en Categoría I, 16-22°C en Categoría II, y 15-23°C en Categoría III.

Por ello, en invierno podríamos distinguir entre las recomendaciones para espacios de oficinas (con actividades sedentarias) de consignas entre 21-23°C, a las recomendaciones para zonas expositivas propias de un museo hasta un mínimo de 17°C, si va en beneficio de la conservación de las colecciones (valor límite inferior según CP-0921). Una consigna baja de temperatura redunda además en una menor demanda y consumo energético del edificio, como puede deducirse con facilidad. Para este estudio en condiciones de **invierno**, **consideraremos como adecuados para la zona expositiva valores de 21°C (-3/+2°C, esto es 18-23°C)**, siguiendo estudios previos realizados en museos [4].

2.2. DESCRIPCION DE EDIFICIO Y DEL SISTEMA DE CONTROL AMBIENTAL DEL MUSEO DE NAVARRA

2.2.1. Características generales del MN

El Museo de Navarra está situado en Pamplona, entre el Paseo de Ronda y la Cuesta de Santo Domingo al borde de las murallas de Pamplona (Ver Fig.1). Al sur-oeste da a un patio cerrado junto al patio de la Escuela Infantil N^º Sra. de los Ángeles. El Museo de Navarra tiene su sede en el antiguo Hospital de Nuestra Señora de la Misericordia de Pamplona (sigo XVI) desde 1956 con la reforma del arquitecto José Yarnoz Larrosa.

Fue posteriormente remodelado y rehabilitado de manera integral en 1990 por los arquitectos Garcés y Soria. Extractado de su web, se adjunta el concepto del proyecto *“...La remodelación de su interior se desarrolló a partir de un concepto espacial único y rotundo: la incrustación en el interior del mismo de un elemento nuevo con fuerza suficiente para modificar las referencias arquitectónicas internas del antiguo edificio, y con proporciones suficientemente generosas para transformar el Museo en un edificio definitivamente público. Los efectos de la incrustación interior de un elemento nuevo se extienden en el exterior solamente en los puntos más singulares y con mayor relación con la ciudad: la entrada y el jardín posterior sobre la muralla. Con esto se pretende manifestar cronológicamente la importante renovación del Museo, sin alterar las características arquitectónicas generales de su frente más público...”*.

En 2011 se reabrió la sala de Prehistoria, situada en el sótano del mismo, tras un proceso de eliminación de barreras arquitectónicas, y recientemente se ha reubicado la fototeca en sótano.



Fig. 1. Imagen aérea del Museo de Navarra (google maps)

El Museo de Navarra se organiza siguiendo la morfología del edificio. El ala más larga y longitudinal está dedicada a las exposiciones con una escalera de acceso público y orientaciones principales sur-oeste y nor-este (planta baja + 4 alturas), mientras que el ala más corta alberga principalmente los espacios de oficinas con una escalera de acceso para los trabajadores del MN con orientaciones sur-este, nor-este y nor-oeste (planta baja + 3 alturas). La planta baja incorpora la antigua capilla que funciona como sala de exposiciones, un salón de actos y la sala de didáctica (que da al patio lateral con orientación nor-oeste), así como el acceso a través de la Galería Azul a la sala de exposiciones de prehistoria situada en el sótano,

bajo un patio con un gran lucernario central. La sala de exposiciones temporales del MN es interior y está situada en la planta baja del ala principal, junto al gran vestíbulo de acceso.



Fig.2. Imágenes de las fachadas principales y de los patios interiores del Museo de Navarra

2.2.2. Características constructivas (fachadas y cubiertas)

Las fachadas principales del museo, tanto en oficinas como en el ala expositiva, son muros de carga de ladrillo caravista o revocado con espesores variables según plantas. Están compuestas por el ladrillo original en distintas formaciones, con un tabique trasdosado al interior para regulación y sin cámara de aire. Las fachadas no tienen aislamiento. Cuando los radiadores no están colocados debajo de las ventanas (en puertas balconeras o ventanas de cuarta planta) están colocados en hornacinas disminuyendo el espesor de las fachadas (ver Fig.3).

Los huecos tienen las carpinterías de aluminio oscuro sin RPT con apertura pivotante sobre eje vertical y vidrios dobles con cámara de aire. considerar las carpinterías de aluminio sin RPT. Aunque no se tienen valores concretos, por la época se puede suponer en las carpinterías, un valor típico de $U=5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, y en los vidrios dobles con cámara de aire, valor típico de $U=2,7\text{-}3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, y de factor solar $g=0,76$ [5]. **Ningún hueco tiene sistemas de sombreamiento al exterior**, sólo unos estores interiores para regulación de la iluminación natural.

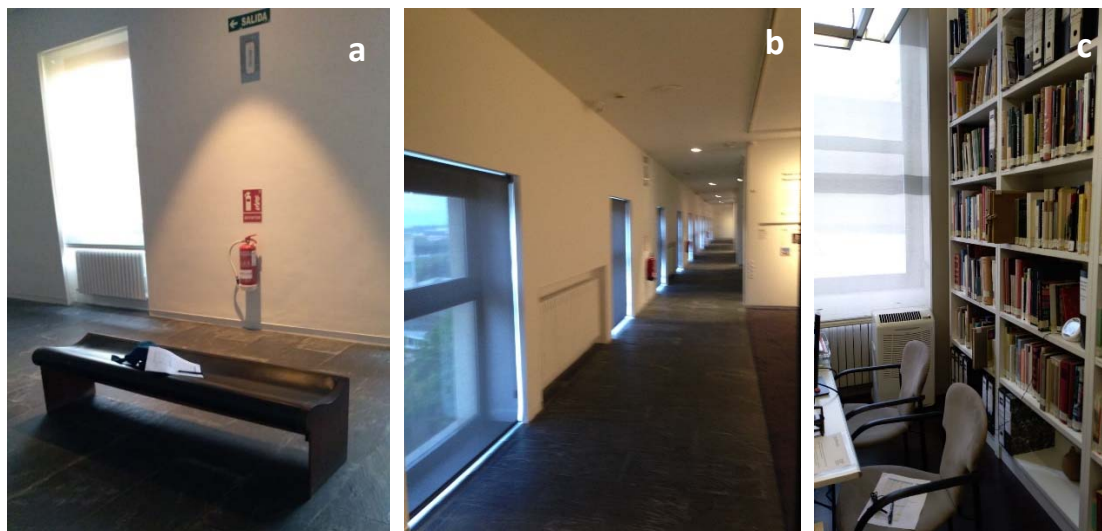


Fig.3. Hueco tipo de las plantas 1ª a 3ª del ala principal de exposiciones (a), hueco de planta 4ª (b), y hueco en oficinas (c)

En el edificio del MN hay varios tipos de cubierta. La cubierta principal es inclinada de teja (dando directamente a las salas, como en la zona expositiva oeste de planta 4ª o el ala norte de las oficinas en planta 3ª), o con una entrecubierta (zona este en ala principal, y zona sur y este en planta de oficinas, actualmente con uso de almacén). Hay varios tipos de cubierta plana: una de grava sobre la sala de didáctica (planta baja), otra de pavimento de piedra sobre la sala de prehistoria (sótano), y una última ajardinada sobre el vestíbulo principal de planta baja (ver sección transversal en Fig.4). No se disponen detalles constructivos de las cubiertas. La planta baja presenta diferentes espacios que corresponden con las distintas modificaciones y reformas de los años 90, presentando mayores huecos acristalados.



Fig.4. Sección transversal del edificio del MN, realizada por el estudio Torres-Quintanilla, donde se pueden apreciar los distintos tipos y alturas de las cubiertas inclinadas, y la cubierta plana ajardinada sobre el vestíbulo

2.2.3. Sistemas actuales de acondicionamiento higrotérmico y control del MN

Los museos en la actualidad tienen altas exigencias en cuanto a requerimientos de estabilidad higrotérmica para garantizar la conservación de las colecciones, así como el bienestar de los visitantes y de los trabajadores (vigilantes en sala, oficinas, restauradores, etc.).

El Museo de Navarra sólo cuenta en la actualidad con radiadores como sistema de calefacción para invierno, y con humidificadores y deshumidificadores portátiles en determinadas salas para controlar la humedad relativa. No hay sistemas generales de refrigeración, ni de renovación de aire, y sólo se ventila abriendo las ventanas puntualmente cuando hace mucho calor y en la zona de las escaleras. Hay vitrinas para objetos especiales colocadas en las plantas inferiores, pero no cuentan con sistemas de acondicionamiento (recientemente se ha cambiado la iluminación a otra de tipo Led para reducir las temperaturas en el interior de las vitrinas).

Las únicas salas que tienen aire acondicionado son la fototeca en planta sótano, algunas oficinas en la zona de administración (oficinas 1C, 1D y 1E en planta 1ª, y oficina 2B en planta 2ª, todas en orientación sur-este), y el taller de didáctica y el salón de actos de la planta baja. Como se puede ver en las imágenes, todas van con unidades exteriores a fachada (ver Fig.5).



Fig.5. Imágenes de la ubicación de las unidades exteriores de aire acondicionado, de oficinas (izqda.) y del salón de actos (dcha.)

El sistema de calefacción dispone de dos calderas de gasoil de la reforma de los años 90, con una potencia de 670kW y un 90% de rendimiento global de la instalación (según datos proporcionados por el MN). Dispone de ocho circuitos de calefacción: oficinas, iglesia, prehistoria, planta 4, planta 3, planta 2, planta 1 y planta baja (con ramales con llaves de corte para la sala de didáctica, salón de actos y galería azul). La regulación de dichos circuitos es manual y a demanda según el uso y la climatología (existe una regulación por temperatura, pero no funciona bien). No hay contadores diferenciados, sólo se dispone del consumo total de gasoil. Existen aportes puntuales de calefacción mediante bomba de calor (en sala de didáctica). En 2015 se realizó una reforma de la instalación de calefacción de planta baja respecto a la original, y se instalaron nuevos radiadores junto a los ventanales de la galería azul y del vestíbulo central. La calefacción de la capilla es con suelo radiante, sobre el que hay una cámara de aire y un pavimento de madera, por lo que su desempeño no es muy eficiente.

Se ha tenido acceso a datos desglosados estimados de la calefacción de 2012¹, siendo un total de 43.657 litros de gasoil, lo que se estima en 80,62 kWh/m² anual. El desglose de ese año, daba el 83,6% del peso al museo, el 10,9% a las oficinas, y el 5,5% a la calefacción de la capilla. También se conocen los datos de 2017, 2018 y 2019, que se resumen, junto con los de 2012 en la Tabla 1. Los datos de 2019², suponen un **descenso del consumo de calefacción a 58,63 kWh/m² anual**, que se desglosa asumiendo los mismos porcentajes que en 2012 en la Tabla. Como se ha visto, desde 2012 hay una reducción progresiva de los consumos, especialmente desde 2017. Esto se debe fundamentalmente a la reforma de la instalación que se realizó en 2015 en la planta baja (nueva instalación de conductos y emisores), a que, desde mantenimiento, se va regulando la instalación para reducir las temperaturas inadecuadamente altas junto con las menores temperaturas exteriores invernales de los últimos años.

Tabla 1. Resumen de consumos de calefacción del Museo de Navarra (según datos proporcionados por la propiedad)

	CONSUMO (Litros de gasoil)	CONSUMO (MWh)	CONSUMO (kWh/m ² anual)*	Porcentajes aproximados (según 2012) (MWh)		
				Museo % supuesto 83,6%	Oficinas % supuesto 10,9%	Iglesia % supuesto 5,5%
AÑO 2012	44000	445,28	80,62	372	49	24
AÑO 2017	39000	394,68	71,46	330	43	22
AÑO 2018	33000	333,96	60,47	279	36	18
AÑO 2019	32000	323,84	58,63	271	35	18

*. Superficie supuesta acondicionada de 5.523 m²

Hay cuatro deshumidificadores, dos en la sala de prehistoria (dando a las vitrinas) y dos en la capilla (actualmente no están, depende de la exposición); y humidificadores en el resto de plantas: 2 en planta 4ª (actualmente no están), 1 en planta 3ª (donde el Goya), 5 en la planta 2ª, y 2 en la planta 1ª (actualmente no están). Los humidificadores se rellenan una vez a la semana, y funcionan en horario donde no hay visitas (por el ruido) en verano. El control se realiza de manera manual, con apoyo de los sensores de monitorización *Sensonet*.

El MN cuenta con un sistema de medición de los parámetros higrotérmicos en las diferentes salas y espacios más sensibles debido a la obra expuesta. Se dispone de datos diezminutales de temperatura y humedad relativa desde agosto del año 2009 hasta la actualidad, y se ha tenido acceso a los mismos (sensores *Sensonet*).

Por último, el MN cuenta con un “Programa de control preventivo del bio-deterioro y las condiciones ambientales en el Museo de Navarra” realizado anualmente por la empresa TSA, y se ha podido consultar el informe del año 2018. En él se estudia el comportamiento anual de la temperatura y de la humedad relativa (HR) de las diferentes salas, en base a los datos del

¹ Se ha tenido acceso a un informe realizado en febrero 2012 “Plan de Acción y Ahorro Energético. Museo de Navarra. Gobierno de Navarra”, realizado por la fundación CRANA y Yaho ingenieros. De ahí se han podido sacar datos relacionados fundamentalmente con los consumos energéticos y el sistema de calefacción

² Dato hasta 11 de diciembre de 2019, que se actualizará cuando se dispongan de los datos reales totales del año

sistema de control automático. En él se estudian, las temperaturas y humedades relativas medias, máximas y mínimas, así como las oscilaciones, diarias, mensuales y anuales. En base a estos datos, se describen los parámetros, la patología detectada, y la acción propuesta. En éstas últimas, se aconseja según zonas y medios disponibles:

- estudiar el influjo de la iluminación artificial,
- moderar la calefacción en invierno,
- humidificar en invierno y deshumidificar en verano,
- no exponer determinadas piezas sensibles,
- “ventilar sólo por la noche hasta primeras horas de la mañana con las luces apagadas para evitar atraer insectos” especialmente en verano,
- estudiar la estratificación de la temperatura y de la humedad (especialmente en las salas con mayor altura).

Como recomendaciones generales, el informe propone moderar la calefacción en invierno (rebajar a consignas de 18°C en vez de 22°C) y trabajar con la ventilación de verano, debido a:

- en relación a la humedad relativa, ésta es baja en invierno y la oscilación mensual es elevada.
- en relación a la temperatura, ésta es muy elevada en verano, y tiene oscilaciones anuales elevadas y mensuales muy elevadas en verano

2.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE PAMPLONA

Pamplona está dentro de la zona climática D1, según el DB-HE “Ahorro de energía” del Código Técnico de la Edificación, y está clasificado como Cfb, según la zona climática de Köppen-Geiger, esto es, templado sin estación seca, tipo “oceánico”.

Según los datos de la serie climática 1980-2010 de la Agencia Estatal de Meteorología, AEMET (ver web aemet.es), la temperatura media anual es 12,7°C, siendo el mes más frío enero con media mensual de 5,2°C y mínima media mensual de 1,4°C, y el más cálido agosto, con media mensual de 21,4°C y máxima media mensual de 28,3°C. Según la misma serie climática, la humedad relativa media anual es 67%, los meses más húmedos son diciembre y enero con 78% de HR y los más secos son julio y agosto, con 57% y 58%. Los meses más lluviosos son abril y noviembre.

Las temperaturas medias, máximas y mínimas de los meses de verano (junio a septiembre) fueron superiores a las de la serie climática 1980-2010, y los datos se adjuntan en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales de Pamplona de la serie climática 1980-2010 respecto al año 2019 (*diciembre, hasta el día 17). Se señalan en color, aquellos valores superiores a la serie 1980-2010

	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Serie T _{máx}	25,2	28,2	28,3	24,5	19,3	13,1	9,7
Serie T _{media}	18,6	21,2	21,4	18,2	14,1	9,0	6,0
Serie T _{min}	11,9	14,2	14,5	12,0	8,9	4,8	2,2
2019. T _{máx}	27,42	28,67	29,23	24,98	20,35	11,69	11,90*
2019. T _{media}	19,70	22,23	21,79	18,62	15,17	8,32	8,01*
2019. T _{mín}	12,90	16,73	15,84	13,35	10,87	5,54	4,56*

AEMET define como "Ola de calor", a un episodio de al menos tres días consecutivos, en que como mínimo el 10% de las estaciones consideradas registran máximas por encima del percentil del 95% de su serie de temperaturas máximas diarias de los meses de julio y agosto del periodo 1971-2000 (ver web aemet.es para más información). Dicho percentil máximo diario para Pamplona, para considerar el evento como de **ola de calor es de 36°C** [6]. Estos eventos están relacionados con el Cambio Climático y el calentamiento global, y se prevé que sean cada vez más habituales, de mayor duración y con temperaturas más altas.

Tabla 3 Meses en los que se han dado Olas de calor que han afectado Navarra desde 1975-2019, según AEMET [6]

	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990	1989	1988	1987	1986	1985	1984	1983	1982	1981	1980	1979	1978	1977	1976	1975
Junio																																													
Julio																																													
Agosto																																													
Septiembre																																													

Este verano de 2019, en el que se han realizado las monitorizaciones del MN (17 de junio al 2 de septiembre), se han dado **dos olas de calor en Navarra**, que han afectado no sólo a España sino a parte de Europa occidental, y que han sido excepcionalmente severas. Hay que tener en cuenta, que ante estos eventos los edificios pueden no poder asegurar las condiciones interiores sólo con ventilación natural nocturna y otras medidas pasivas del edificio (sombreamiento, inercia, aislamiento, etc.) en localidades como en Pamplona, donde no es habitual el uso del aire acondicionado. Como ya se ha explicado, en el edificio MN no hay sistemas de aire acondicionado que puedan funcionar ante estos eventos. En concreto, las olas de calor de 2019 en Navarra (y que por lo tanto han afectado a las condiciones interiores del MN) se han dado en las siguientes fechas:

- 26-30 junio (con temperaturas máximas en Pamplona de 36,3°C, 38,9°C, 37,2°C, 39,6°C y 39°C, según datos de meteonavarra, en la estación de Gobierno de Navarra, situada junto al Arzobispado)
- 22-25 julio (con temperaturas máximas en Pamplona de 37°C, 37,4°C, 36,9°C, y 37,4°C, según misma fuente)

Las olas de frío también se estudian en AEMET, pero hay que tener en cuenta que, ante estos eventos, los edificios en Pamplona pueden responder con sistema de calefacción, lo que se deduce en un mayor consumo de energía, pero en general no se comprometen las condiciones interiores de temperatura y humedad. Estos eventos muy fríos llevan parejas condiciones de humedad relativa muy bajas (debido a las bajas temperaturas), por lo que hay que controlar que la humedad relativa no sea excesivamente baja. En la campaña de monitorización de invierno 2019 en la que se ha realizado este estudio, no se han dado olas de frío.

La temperatura media, máxima y mínima de noviembre y diciembre 2019 también se adjuntan en la Tabla 2 (no se tienen datos definitivos, de las medias de diciembre 2019). Los valores mensuales máximos y medios de noviembre fueron inferiores a los de la serie climática.

Para estudiar los datos de las condiciones interiores del MN, respecto a las condiciones climáticas exteriores, se ha colocado una estación meteorológica en una terraza ajardinada del MN, y los datos se compararán con los de la estación meteorológica de Gobierno de Navarra,

cuyos datos están disponibles on-line en meteo.navarra.es (ver Fig.6), y que está situada a 200m, junto al arzobispado.



Fig.6. Estación meteorológica de Gobierno de Navarra (Izqda.) y Estación de SAVIArquitectura colocada en una terraza ajardinada del propio Museo de Navarra (Dcha.)

3. METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se especifica la metodología seguida en la investigación.

3.1. MONITORIZACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES

Se han realizado monitorizaciones diezminutales de temperatura (ambiente, superficial y de globo), humedad relativa, y de concentración de ppm de CO₂. Se han realizado monitorizaciones con registradores autónomos (datta loggers) de temperatura y humedad relativa (tipo *Madge-tech*, con precisión $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ en temperatura y $\pm 3\%$ en HR), la concentración de ppm de CO₂ con registradores conectados a red (tipo *Extech*, precisión 5% lect. + 50 ppm), y los trípodes de evaluación de variabilidad térmica y los ensayos de flujo térmico con equipos de alta precisión (serie *Almemo* de *Ahlborn*, con precisión $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ en los PT100 y NTC; y sondas conectadas con cable con registrador de datos).

Se han colocado sensores “testigo” de temperatura y humedad relativa (tipo *MadgeTech*) junto a 5 de los sensores del MN (tipo *Sensonet*) en la campaña 1 de verano, para comprobar que el margen de error entre los distintos sensores está dentro de los márgenes del propio sensor, con resultados adecuados. A este respecto, desde MN, se han ajustado las pilas de los sensores y se ha estudiado como ajustar los tiempos de medición de los sensores de MN a minutos exactos (00:00, 00:10; 00:20, etc.), para poder comparar datos entre sensores de ambas fuentes con fiabilidad.

MONITORIZACION EN CONDICIONES DE VERANO

Se adjunta la planificación concreta de la monitorización de verano 2019, que se complementa cuando se precisa con los datos que automáticamente registran los sensores de MN (sistema *Sensonet*), para el análisis de los datos de las condiciones ambientales interiores. Debe resaltarse que cuando se habla de “**Condiciones de verano**” se habla de **condiciones exteriores superiores a las de confort de las personas (periodo sobrecalentado)** y que se necesitan medidas pasivas o activas del propio edificio para asegurar el confort de las personas en el interior de los mismos, y que no haya condiciones de “sobre calentamiento”. En el clima típico de Pamplona, los veranos son templados con algunos periodos más cálidos que otros, y debido a la duración de los presentes trabajos, se ha obtenido datos desde junio a septiembre.

Se han organizado los trabajos en cinco campañas, desde el 17 de junio hasta el 2 de septiembre. En cada una de las campañas, además de la colocación de diferentes **sensores de temperatura y humedad relativa** por todos los espacios significativos del museo para complementar los datos de los sensores del MN, se han colocado otros que recogen mediciones de **concentración de ppm de CO₂** (para evaluar la calidad del aire). Además, se han colocado dos **trípodes** por campaña, para medir más en profundidad los diferentes espacios; en concreto, estratificación de temperaturas, temperaturas superficiales en suelo y muros, y temperatura de globo. Estos trípodes se han colocado en los siguientes espacios, durante las cinco campañas de verano:

- **Campaña 1.** 17 de junio - 1 de julio. Trípodes en salas de exposición en planta primera y cuarta, en orientación oeste
- **Campaña 2.** 1 de julio - 22 de julio. Trípodes en salas de exposición en planta primera, en orientaciones este y oeste
- **Campaña 3.** 22 de julio - 5 de agosto. Trípodes en sala de temporales y en talleres de niños en planta baja
- **Campaña 4.** 5 de agosto - 19 de agosto. Trípodes en sala de exposición en planta tercera, en orientaciones este y oeste
- **Campaña 5.** 19 de agosto – 2 de septiembre. Trípodes en oficinas a norte y a sur, en zona de administración del MN, en planta 1

La localización exacta en planta de los sensores de monitorización de la primera campaña, se incluye en el Anexo 1. Se ha buscado tener medidas de todos los espacios significativos del museo, y en las salas expositivas, cubrir distintas plantas y orientaciones.

MONITORIZACION EN CONDICIONES DE INVIERNO

Con el mismo criterio que en la campaña anterior, pero con las limitaciones propia de tiempos en la monitorización de invierno 2019, se adjunta en primer lugar la planificación temporal de las campañas de monitorización de invierno 2019. Debe resaltarse que cuando se habla de **“Condiciones de invierno” se habla de condiciones exteriores inferiores a las de confort de las personas (periodo infracalentado)** y que se necesitan medidas pasivas o activas del propio edificio para asegurar el bienestar de las personas en el interior de los mismos. Es por esto que en Pamplona (y debido a la propia limitación temporal del presente trabajo de monitorización) pueda considerarse estas condiciones desde noviembre, después de comprobar dichas condiciones con las mediciones exteriores (temperatura exterior, fundamentalmente), y como se puede comprobar con los datos de la tabla 2.

Al igual que en verano, **se han tomado mediciones de temperatura y humedad relativa, y de concentración de ppm de CO₂ en las mismas localizaciones que en la monitorización anterior**, y se han colocado trípodes de otras mediciones. Estos trípodes se han colocado en los siguientes espacios, durante las dos campañas de invierno:

- **Campaña 1.** 18 de noviembre – 2 de diciembre. Salas de exposición en planta primera y cuarta, en orientación oeste
- **Campaña 2.** 2 de diciembre- 16 de diciembre. Salas de exposición en planta primera, en orientaciones este y oeste

3.2. ENCUESTAS. EVALUACIÓN DEL AMBIENTE INTERIOR

Se han pasado dos tipos de encuestas, una a visitantes y otra a trabajadores, en las dos épocas diferenciadas de condiciones ambientales interiores (invierno y verano).

3.2.1. Visitantes

Se dispone de los datos históricos de visitantes al Museo de Navarra (ver Tabla 4). Se observa un incremento claro de visitas desde 2017 a 2019. Los meses con mayor afluencia de público son tradicionalmente marzo, abril, mayo y agosto, con más del 40% de la afluencia del público, aunque este año 2019 también han sido muy concurridos los meses de febrero y noviembre. El horario habitual de apertura al público del museo es de martes a sábado, de 9:30-14h y de 17-19h, y los domingos y festivos de 11h-14h. Los lunes el MN está cerrado, y el resto de festivos que cierra son el 6 y el 7 de julio, y el 25 de diciembre y el 1 de enero.

Tabla 4. Visitas al Museo de Navarra. Tabla elaborada a partir de los datos proporcionado por MN (Nota: los datos de 2019, incluyen las visitas hasta noviembre de 2019)

AÑO	TOTAL VISITAS	VISITAS Julio+Agosto	% del total en Julio+Agosto	VISITAS Nov+Dic	% del total en Nov+Dic
2017	33.646	5.195	15,4	5.529	16,4
2018	42.259	8.613	20,4	7.023	16,6
2019	51.755	9.501	18,4	11.235	21,7

Se han diseñado unas encuestas a los visitantes al museo en español y en inglés, preparadas para poder hacerse on-line (con google forms), aunque por facilidad se han hecho en papel. Se han pasado durante todo el verano de 2019 (junio a septiembre) y en invierno 2019 (noviembre y diciembre). Los meses de julio y agosto, así como noviembre y diciembre, reciben más del 15% de las visitas cada periodo (ver Tabla 4), aunque con condiciones de temperatura muy diferentes entre sí. El mes de noviembre de 2019 recibió un número excepcionalmente alto de visitas en comparación con el resto de los meses (11.235 personas). La encuesta a los visitantes incluye:

- Fecha y aspectos generales del visitante (edad, género y nacionalidad).
- Sensación térmica general dentro del edificio.
- Satisfacción respecto a las temperaturas interiores.
- Indicación del lugar donde esa posible insatisfacción térmica ha sido más acusada.

La encuesta es idéntica en invierno y en verano, y el modelo concreto se adjunta en el Anexo 2.

3.2.2. Trabajadores

Se ha diseñado una encuesta sobre las condiciones ambientales interiores a los trabajadores del MN. Se ha pasado en septiembre 2019, cuando había una mayoría de trabajadores en el MN (debido a la variabilidad en las vacaciones de verano de los trabajadores), y en diciembre 2019. El horario tipo de los trabajadores es de 8:30-14:30h. La encuesta incluye:

- Fecha y aspectos generales del trabajador (fechas, edad y género).
- Información sobre el puesto de trabajo (cuánto tiempo lleva en el mismo, que tipo de trabajo es, actividad física que supone, días de la semana y horario de trabajo,

situación en el edificio, y si el puesto de trabajo está cerca de una ventana o una fachada).

- Evaluación térmica del ambiente interior de su espacio de trabajo (sensación térmica, satisfacción respecto a la temperatura, causas estimadas de los posibles problemas de discomfort, y ropa típica).
- Evaluación de la calidad del aire interior de su espacio de trabajo (satisfacción respecto a la calidad del aire y causas estimadas de los posibles problemas).
- Evaluación de la calidad acústica interior – ruido - de su espacio de trabajo (satisfacción respecto a la calidad acústica y causas estimadas de los posibles problemas).
- Evaluación de la iluminación, los deslumbramientos y las vistas de su espacio de trabajo (satisfacción respecto a la iluminación, causas estimadas de los posibles problemas, identificación de problemas de deslumbramientos, y valoración de las vistas).

La encuesta es idéntica en invierno y en verano, salvo la referencia explícita a la estación en alguna de las preguntas (invierno / verano). Dicha encuesta estaba preparada para hacerse on line (con google forms), aunque finalmente se recogió en papel porque parecía una mejor manera de poder llegar a más personas. El modelo concreto se adjunta en el Anexo 2.

3.3. OTROS ENSAYOS: PUERTA-VENTILADOR, TERMOGRAFÍA Y DE FLUJO TÉRMICO

Además de la monitorización de condiciones ambientales interiores anteriormente expuesta, se han realizado otros ensayos para caracterizar el edificio en condiciones reales en relación a la eficiencia energética del museo: ensayo de puerta-ventilador, termografías, y ensayo de flujo térmico.

En primer lugar, se ha realizado el **ensayo de puerta-ventilador** (ensayo blowerdoor) para conocer el grado de estanqueidad al aire de la envolvente del edificio. Este dato es fundamental para la fiabilidad de las simulaciones energéticas, por lo que tener un orden de valores lo más real posible es fundamental. El ensayo se ha realizado según el método B (envolvente del edificio) de la normativa EN13829:2002 [7], porque el edificio del MN no tienen ventilación mecánica controlada (la ventilación se realiza de modo manual, mediante la apertura de ventanas). Todas las aberturas intencionadas ajustables deben ser cerradas y el resto de aberturas realizadas deben ser selladas (tomando notas sobre el estado, y sobre los cierres y sellados). La normativa española CTE-HE “Ahorro de energía”[8] no exige este ensayo. El ensayo se realiza forzando una diferencia de presión y depresión de 50Pa entre interior y exterior, y dando como resultando las renovaciones horas a esa presión ($n_{50} - h^{-1}$), entre otros resultados. Según la norma UNE EN 12831 (Tabla D.7) [9], para edificios distintos que viviendas unifamiliares, si:

- **$n_{50} < 2 h^{-1}$, se considera un grado de estanqueidad alto** (se corresponde con edificios de alta calidad del aislamiento de puertas y ventanas)
- **$n_{50} = 2 - 5 h^{-1}$, el grado de estanqueidad se considera medio** (se corresponde con edificios de doble cristal en ventanas, y aislamiento normal)
- **$n_{50} > 5 h^{-1}$, el grado de estanqueidad se considera bajo** (se corresponde con edificios de cristal sencillo en ventanas, y sin aislante)

Finalmente, este ensayo se ha realizado en aquellas zonas donde no se pudiera comprometer la integridad de las obras de la colección. Se ha realizado con una puerta modelo Minneapolis Blowerdoor.

En segundo lugar, se han realizado **termografías interiores y exteriores** del edificio en condiciones reales de diferencia de presión, cuando las condiciones exteriores han sido adecuadas (diferencia adecuada de temperaturas interior-exterior y uso de calefacción), y también durante el ensayo de puerta ventilador (al forzar la depresión interior a 50Pa, se pueden detectar más fácilmente el origen de las infiltraciones de aire, defectos constructivos, etc.).

Con la termografía podemos detectar los puentes térmicos de los edificios, el origen de las infiltraciones o la presencia de humedades. Al analizar las termografías, como criterios generales, hay que tener en cuenta que, aunque la mayoría de los materiales utilizados en la construcción tienen emisividades altas ($\epsilon=0,9-0,95$), algunos materiales principalmente metálicos tienen emisividades más bajas, así como que el vidrio es opaco al infrarrojo, y que se ha de poder identificar correctamente aquello que sólo es un reflejo (por lo que no indica diferencia de temperaturas). Se han realizado con una cámara termográfica FLIR T1020 (Sensor de IR 1024 x 768px.).

En tercer lugar, se han realizado **ensayos de flujo térmico** en distintos puntos de la fachada, que complementan los datos de las distintas catas realizadas con anterioridad. Estos ensayos se realizan siguiendo la norma ISO 9869 [10]. Mediante este ensayo **se obtiene la transmitancia térmica (U) de un paramento en condiciones reales de uso**, y sin un ensayo destructivo. Se utilizan sensores de temperatura ambiente y superficial, interiores y exteriores (4 sondas de temperatura) y una placa de flujo térmico. Éstas deben colocarse en un lugar comprobado previamente mediante termografía como adecuado y representativo de todo el elemento, y debe instalarse lejos de la influencia de puentes térmicos, grietas, etc., y de la influencia de elementos de calefacción, refrigeración o ventilación. El ensayo debe realizarse cuando haya una diferencia adecuada entre interior y exterior (diferencia típica de 20°C), siendo las oscilaciones diarias de temperatura lo menores posibles, y el ensayo se realizará durante al menos 3 días. Los ensayos se han realizado con sensores de temperatura superficiales y ambiente PT100 (precisión $\pm 0,1^\circ\text{C}$) y placas de flujo térmico de 25x25cm, de la serie *Almemo* de *Ahlborn*.

4. RESULTADOS. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LOS MESES DE VERANO

La evaluación de las condiciones ambientales de un edificio cuyo uso principal es un museo está relacionada con los requerimientos relacionados con la conservación de las colecciones, así como con el bienestar de las personas (visitantes y trabajadores), como se ha explicado en el apartado 2.1. Además, en el edificio, hay otros usos de oficina, con requerimientos menos exigentes y mayores posibilidades de acondicionamiento higrotérmico (espacios menores, posibilidad de uso de equipos portátiles, posibilidad de apertura de ventanas sin riesgo, etc.). Por ello, se ha diferenciado el estudio entre las zonas expositivas y las de oficinas. En el primer grupo, se incluyen también el taller de restauración (situado en el ala corta de oficinas), y

Aunque los trabajos de monitorización se han realizado a través de las campañas descritas en el apartado 3.1.1 (debido a que no se pueden descargar los datos de los registradores *on-line* sino que hay que hacerlo *in situ*), la evaluación de las condiciones ambientales interiores de verano de este informe se realiza en relación a los periodos que se definen a continuación.

- Desde el 24/06 al 12/08: sólo a petición de los vigilantes de sala, siempre que no dé directamente el sol, determinados huecos de la escalera (2 óculos de planta 1ª, 2 óculos de planta 2ª, 1 ventana de planta 3ª y 1 ventana de planta 4ª). Este protocolo se llevó a cabo desde 2015.
- Desde el 13/08 al 25/08: se abrirán de 8-9h y de 20-21h (es decir, dos horas en horario cerrado a los visitantes), de todas las ventanas de las escaleras “y las ventanas que tienen “dos puntos” y sus equivalentes de planta 1ª a 4ª” (datos por confirmar). Se girarán y se bajará el estor. Se podrá abrir a petición de los vigilantes de sala en otro horario, siempre que no dé el sol directo.
- Desde el 26/8 hasta final de septiembre, se amplió el horario de ventilación anterior a 7-9h y de 20-21h (es decir, tres horas en horario cerrado a los visitantes)

18jun	19jun	20jun	21jun	22jun	23jun	24jun	25jun	26jun	27jun	28jun	29jun	30jun	1jul	02jul	03jul	04jul	05jul	06jul	07jul	08jul	09jul	10jul	11jul	12jul	13jul	14jul	15jul	16jul	17jul	18jul	19jul	20jul	21jul	22jul	23jul	24jul	25jul	26jul	27jul	28jul	29jul	30jul	31jul	01ago	02ago	03ago	04ago	05ago	06ago	07ago	08ago	09ago	10ago	11ago	12ago	13ago	14ago	15ago	16ago	17ago	18ago	19ago	20ago	21ago	22ago	23ago	24ago	25ago	26ago	27ago	28ago	29ago	30ago	31ago	01sep	02sep	03sep		
Campaña 1										Campaña 2										Campaña 3										Campaña 4										Campaña 5																																							
Periodo 1																				Periodo 2																				Periodo 3																				Periodo 4																			

4.1. EVALUACIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES DEL ESPACIO EXPOSITIVO

Para la evaluación de las temperaturas, como uno de los parámetros principales de la evaluación de las condiciones ambientales interiores en el espacio expositivo, se han estudiado las condiciones generales a través de todo el verano, y de los cuatro periodos definidos. Se ha analizado su relación con los umbrales máximos de 27°C y con los límites adaptativos, y se ha

podido diferenciar entre el comportamiento térmico en plantas sótano y baja, y plantas 1-4. Se han evaluado las oscilaciones térmicas, y se ha hecho un estudio comparativo entre las temperaturas interiores y exteriores de distintas salas.

A. TEMPERATURAS MÁXIMAS Y PROMEDIO

En este apartado se **estudian las temperaturas alcanzadas en el verano de 2019** en el Museo de Navarra en la zona expositiva del museo, incluido el taller de restauración de la zona de oficinas. En primer lugar, en la Figura 8 se puede ver una gráfica general con todos los sensores de monitorización de todo el verano, donde se indican los límites recomendados para museos (17-27°C), y los límites superiores e inferiores adaptativos para el confort de las personas (indicados en las figuras como TopSUP y TopINF para categoría II y III), según se ha indicado con anterioridad en el apartado 2.1.

Los **umbrales máximos de temperatura** para la conservación de las colecciones (27°C) se superan prácticamente todo el verano en las plantas 1ª-4ª. También es de destacar el sobrecalentamiento del taller de Restauración en la planta 2ª de oficinas (aunque solo se tienen datos del primer periodo en junio). En la planta baja y sótano, las temperaturas son en general inferiores al umbral de 27°C.

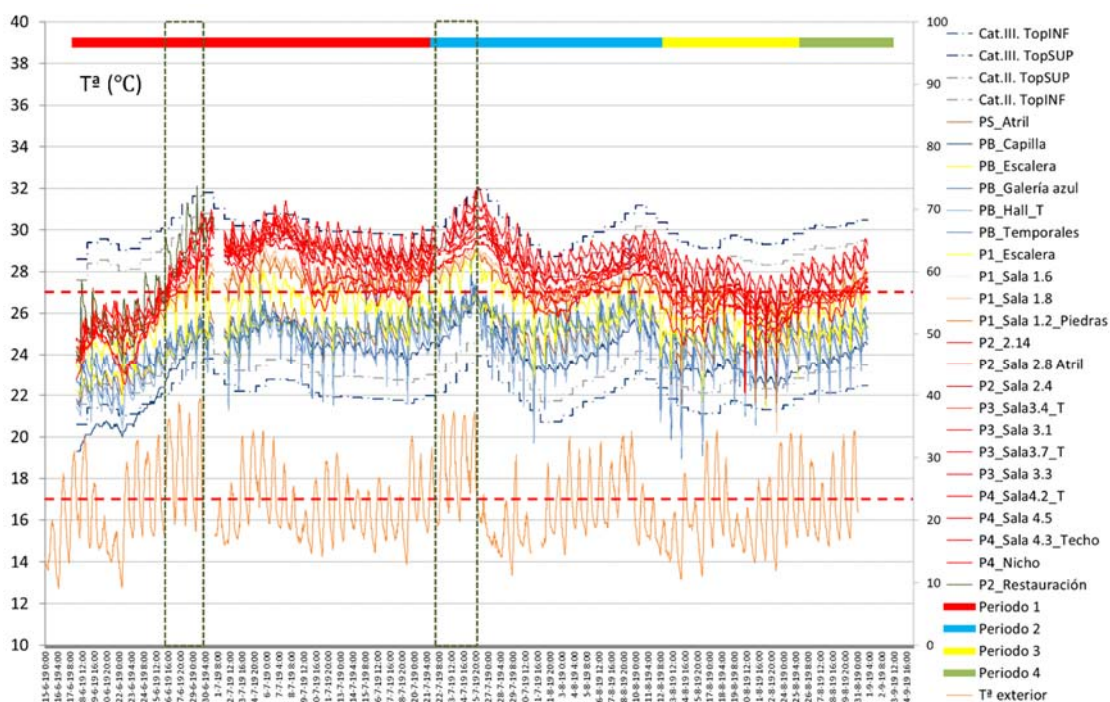


Fig.8. Datos de temperatura interior de la monitorización general de verano en zona expositiva (datos diezminutales), en relación a los límites adaptativos (definidos para las Categorías II y III, como TopSUP y TopINF), y la recomendación para conservación de colecciones (17-27°C) En línea discontinua se indica cuando fueron las olas de calor (26-29 de junio y 22-25 de julio de 2019)

Respecto a los límites adaptativos de confort para las personas, estos se superan en determinadas salas de las plantas superiores ocasionalmente para la Categoría III y frecuentemente para la Categoría II. Se ha de hacer notar, que estos umbrales dependen de las condiciones exteriores (7 días), por lo que durante y después de las olas dos olas de calor, puede no considerarse sobrecalentamiento aun alcanzando temperaturas de 32°C. Estos

límites van bajando después de la ola de calor (con la bajada de las temperaturas exteriores), pero como el edificio no se ha enfriado debido a la alta inercia y a la nula ventilación, es entonces cuando se producen los sobrecalentamientos respecto a la aproximación adaptativa (ver 5 y 6 de julio, en Fig.8, donde se alcanzan temperaturas máximas similares a las alcanzadas durante la ola de calor, con temperaturas exteriores inferiores).

En la Tabla 5, se resumen los porcentajes de horas en los que se ha superado el umbral máximo de 27°C en los sensores del MN, durante la monitorización de verano 2019 y por periodo (considerando la duración de cada periodo).

Tabla.5. Resumen de % de horas por periodo con temperaturas mayores de 27°C, y % de días por periodo con oscilaciones térmicas diarias superiores a 2°C y a 5°C. Nota: el periodo P1 comprende 34 días, el P2 22 días, el P3 13 días, y el P4 6 días. El periodo total se refiere el periodo total monitorizado, por lo que puede haber variaciones en dicho periodo (ver sondas de P2 restauración, P4, sala 4.2, y P4 sala 4.3)

Variable	% total horas >27°C					%DIA_OSCDIA_>2°C					%DIA_OSCDIA_>5°C				
	P 1	P 2	P 3	P 4	Total	P 1	P 2	P 3	P 4	Total	P 1	P 2	P 3	P 4	Total
Espacio															
PS_Atril	0	1	0	0	0	6	9	31	0	11	0	0	0	0	0
PB_Capilla	0	0	0	0	0	3	9	31	0	9	0	0	0	0	0
PB_Escalera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PB_Galería azul	1	6	0	0	2	48	64	77	83	61	0	5	8	0	3
PB_Hall_T	0	0	0	0	0	67	91	92	83	80	0	5	15	0	4
PB_Temporales	0	3	0	0	1	6	18	46	17	18	0	0	0	0	0
P1_Escalera	23	38	0	6	22	45	41	85	83	54	0	0	0	0	0
P1_Sala 1.6	100	78	11	41	67	0	0	54	17	13	0	0	0	0	0
P1_Sala 1.8	72	85	18	43	64	6	0	62	33	16	0	0	8	0	1
P1_Sala 1.2_Piedras	65	77	10	38	57	3	0	69	0	14	0	0	8	0	1
P2_Restauración	45				45	69				69	0				0
P2_2.14	74	100	58	78	79	0	0	38	0	8	0	0	0	0	0
P2_Sala 2.8 Atril	100	80	0	22	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2_Sala 2.4	100	100	64	99	92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3_Sala3.4_T	100	100	16	41	76	6	0	8	0	4	0	0	0	0	0
P3_Sala 3.1	76	100	96	100	88	0	0	31	0	5	0	0	8	0	1
P3_Sala3.7_T	71	96	15	31	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3_Sala 3.3	74	100	67	100	83	3	0	8	0	3	0	0	0	0	0
P4_Sala4.2_T	38				38	0				0	0				0
P4_Sala 4.5	68	73	3	63	57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4_Sala 4.3_Techo	95				95	0				0	0				0
P4_Nicho	56	67	4	19	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Fig.9. se resumen las **medias, máximas y mínimas de los promedios diarios de temperaturas de las distintas salas durante todo el verano 2019**, donde se aprecia el alcance de dichas temperaturas (máximas y mínimas) y la frecuencia con la que se han dado dichas temperaturas, así como una idea de la estabilidad en los rangos de las temperaturas.

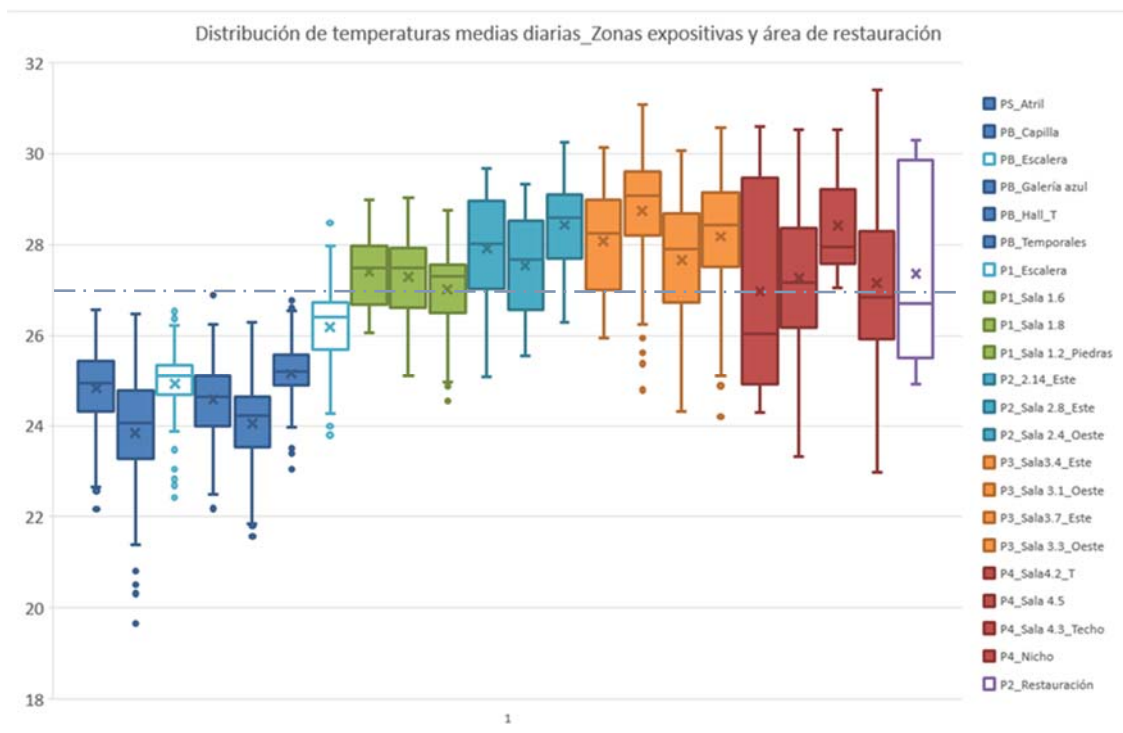


Fig.9. Resumen de temperaturas de todas las salas monitorizadas en verano: medianas, máximas y mínimas de los promedios diarios (cuartil Q2 y Q3, indicando el 50% de las horas), y máximas y mínimas absolutas por periodo

Las mayores temperaturas promedio y máximas se producen durante las dos olas de calor y durante el periodo del 5-8 de julio. De hecho, las temperaturas promedio de muchas de las salas son mayores el día después de la ola de calor respecto al último día de la ola de calor, en ambos eventos. Las temperaturas mayores de todo el verano se alcanzaron durante la segunda ola de calor.

Las mayores temperaturas promedio y máximas se alcanzan en las plantas 3ª y 4ª, y especialmente en las **orientaciones oeste** (por encima de las medidas tomadas en la orientación este, seguida de la norte, a pesar de ser el ala expositiva un único espacio).

En la Sala de restauración se alcanza la temperatura máxima del museo (32,12°C, medida al día siguiente de la primera ola de calor). A este respecto hay que destacar, que no se tomaron medidas más que en la primera campaña, por lo que es de suponer que alcanzaría máximas mayores a lo largo del verano. También se alcanzaron temperaturas medidas de 32°C en el bajo cubierta de la planta 4ª, aunque no tiene uso expositivo sino almacén.

En la Fig.10. se puede ver la **diferencia diaria promedio entre las salas P1-4 y las salas de la planta baja y sótano**, siendo la diferencia de todas las salas considerando todo el verano, de **3,10°C en las temperaturas promedio, y 2,88°C en las temperaturas máximas**. Mientras que estas últimas tienen una temperatura promedio inferior a 27°C todo el verano (sólo teniendo máximas mayores de 27°C durante dos días, el 25 de julio y el 9 de agosto), las salas de P1-4 tienen temperaturas medias mayores de 27°C del 26 de junio al 13 de agosto (y después, 4 días más), y temperaturas máximas mayores de 27°C durante todo el verano a partir de la primera ola de calor (excepto 4 días en agosto).

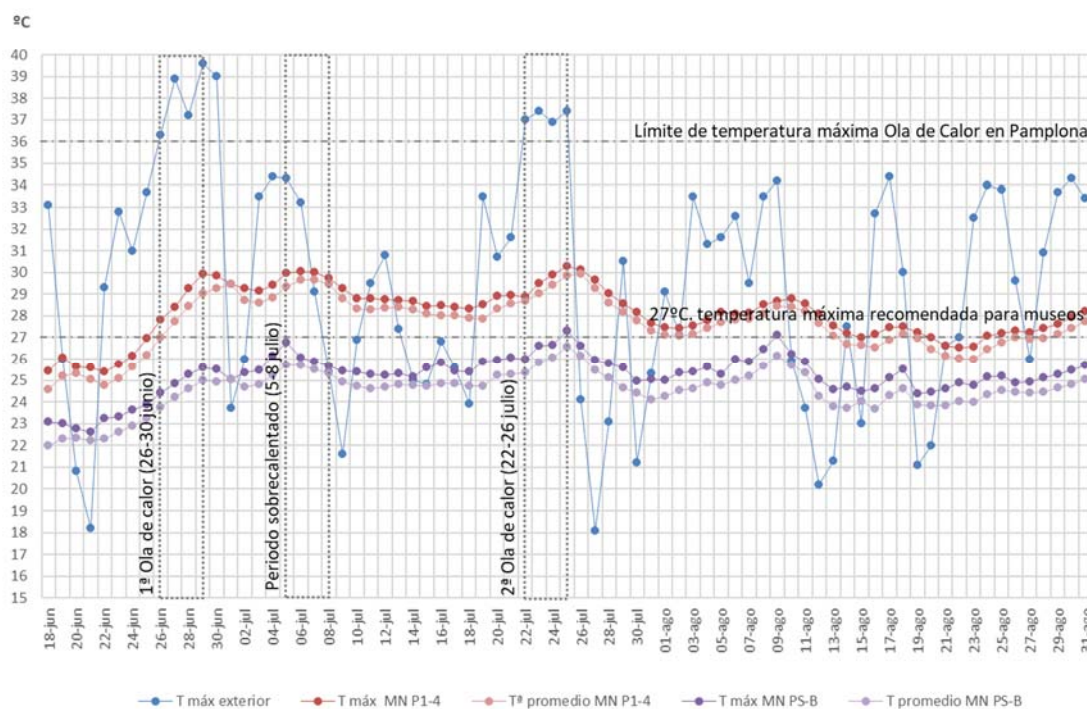


Fig.10. Gráfica resumen donde se indican la temperatura máxima exterior, y las temperaturas máximas y promedio diarias de las salas de las plantas 1-4 y de las salas de planta baja y sótano

B. OSCILACIONES DE TEMPERATURAS

Debido a la importancia de controlar la estabilidad en las **oscilaciones diarias de temperatura para la conservación de las colecciones**, se adjunta en la Fig.11., una gráfica con dichas oscilaciones diarias durante todo el verano, y donde se indica la limitación de las oscilaciones diarias recomendadas para Museos (2-5°C). **En general, el edificio es muy estable con oscilaciones térmicas menores de 2°C**, y las mayores oscilaciones se producen en la planta baja y en la planta 1ª y 3ª, especialmente en el periodo 3. Como se ha especificado en el apartado 4.1, en los periodos 3 y 4 se llevaron a cabo acciones de aumento de la ventilación en las salas.

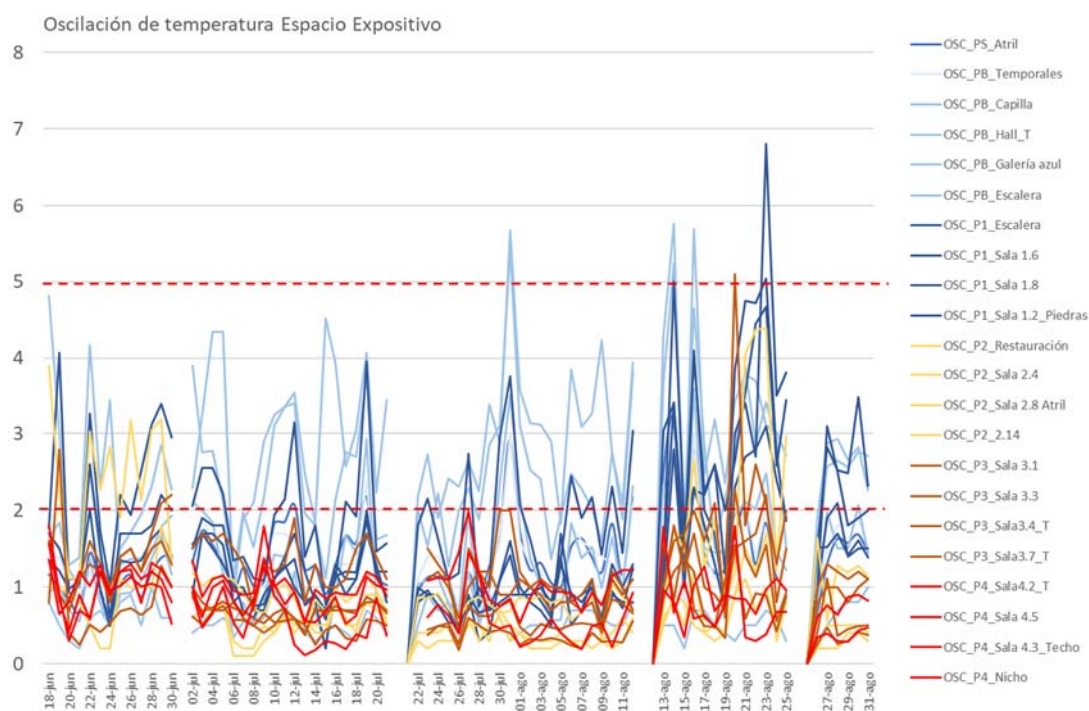


Fig.11. Oscilaciones diarias de temperaturas con la limitación máxima diaria recomendada de 2-5°C

En la Tabla 5, junto con los % de la superación del umbral máximo de temperaturas de 27°C, también se adjunta el % de días que se supera la oscilación térmica recomendada de 2 y de 5°C. Como se puede observar, en las plantas 1-4 el mayor problema está en que se supera el umbral máximo de temperatura, mientras que en la planta baja se observan mayores oscilaciones de temperaturas diarias.

A este respecto, **los mayores problemas que podrían afectar a la colección se observan en la Galería Azul en planta baja, en la Planta 1ª (salas 1.8 en orientación este y 1.2 en orientación oeste) y en la sala 3.1 (oeste).** También destaca la sala de temporales, por porcentajes inadecuados de horas con oscilaciones medias diarias superiores a 2°C.

Finalmente se aporta los promedios de las oscilaciones térmicas diarias, por periodo, de las estancias monitorizadas (Anexo 3).

C. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE TEMPERATURAS EXTERIORES E INTERIORES

A continuación, se ha hecho un **estudio comparativo entre las temperaturas exteriores e interiores** de distintas salas del museo para comprobar la incidencia y el peso en las temperaturas de:

- **las orientaciones**, principalmente en el ala expositiva, entre este y oeste, en planta 2ª y en planta 3ª (Fig.12. y Fig.13.). **Las salas en orientación oeste son siempre más calurosas a pesar de ser una única sala expositiva**, siendo la diferencia mayor entre las salas más cercanas a la escalera, que las alas más cercanas al norte.
- **las alturas** comparando todas las plantas (Fig.14.), y sólo comparando entre planta 1ª y planta 4ª (Fig.15.). En la primera se incluye también la **sala de restauración**, por su sensibilidad a las altas temperaturas exteriores. **La planta más calurosa, con**

las mayores temperaturas exteriores es la planta 4ª, reduciéndose la temperatura conforme se baja de planta, a excepción de la planta sótano que es ligeramente más calurosa que la planta baja (debe considerarse que la planta baja abarca muchas más estancias, incluso la iglesia, y que, en el sótano, únicamente se ha medido en la sala de prehistoria que tiene un gran lucernario central). **Con temperaturas menores, la planta tercera resulta la más calurosa** (en este sentido, hay que destacar que de la planta 4ª se tienen muchas menos mediciones)

- **las distintas acciones** que se realizaron en los distintos periodos de verano (*datos por confirmar*) (Fig.16.).

Se ha considerado la temperatura interior media de ese día de cada sala, y para la temperatura exterior se ha considerado el promedio de la temperatura exterior media de los 4 días anteriores. Esto se ha realizado así, debido a las características del edificio de alta inercia térmica y nula ventilación, y, por lo tanto, con baja vinculación con las condiciones exteriores.

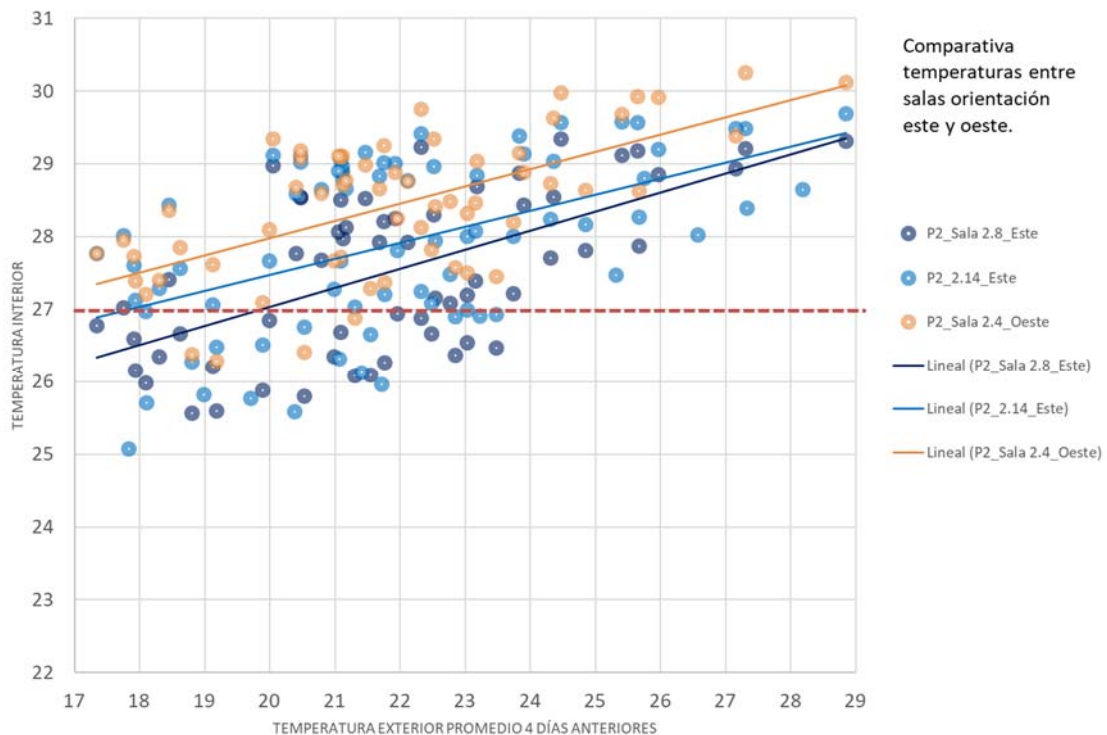


Fig.12. Gráfica comparativa entre las salas de distintas orientaciones de la planta 2 del MN, en relación a las temperaturas exteriores

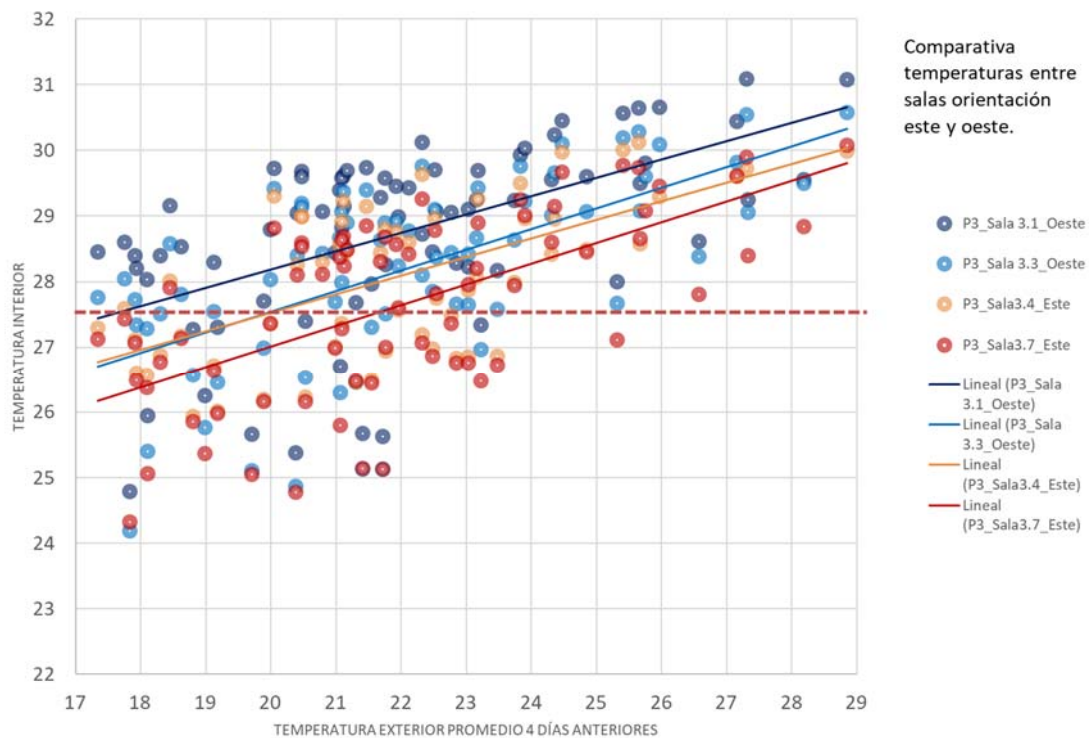


Fig.13. Gráfica comparativa entre las salas de distintas orientaciones de la planta 3 del MN, en relación a las temperaturas exteriores

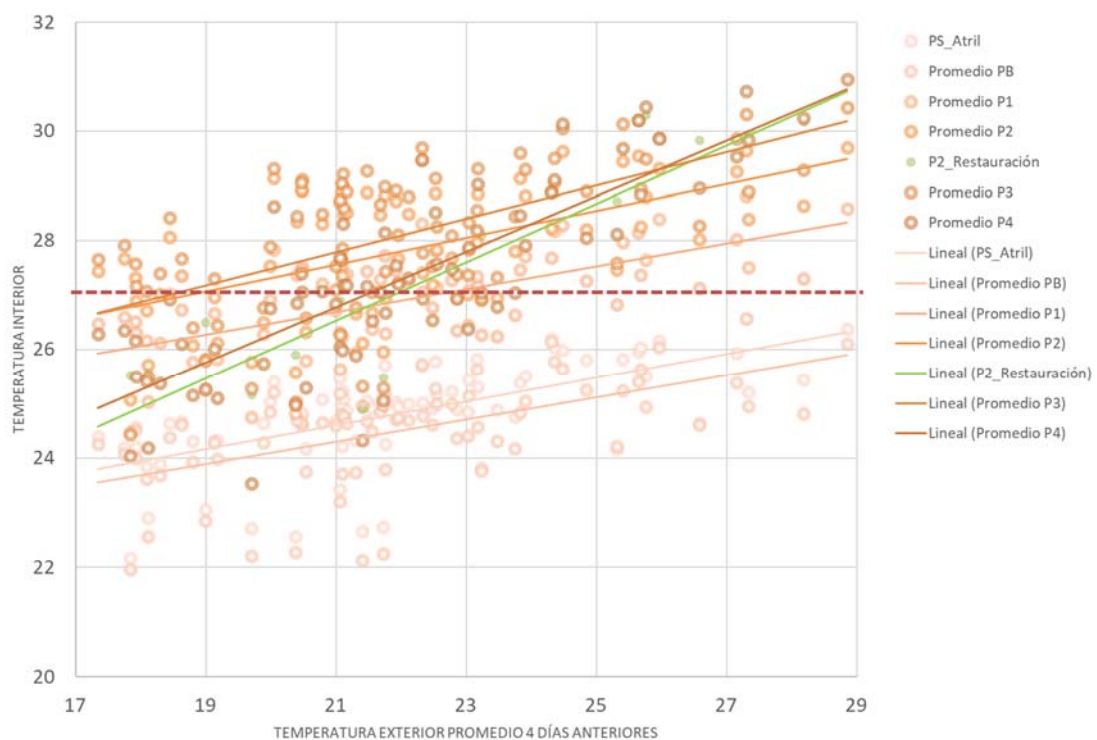


Fig.14. Gráfica comparativa del promedio de todas las plantas del MN en relación a las temperaturas exteriores. Se ha añadido también la sala de restauración, por las altas temperaturas alcanzadas en una sala muy sensible a las mismas

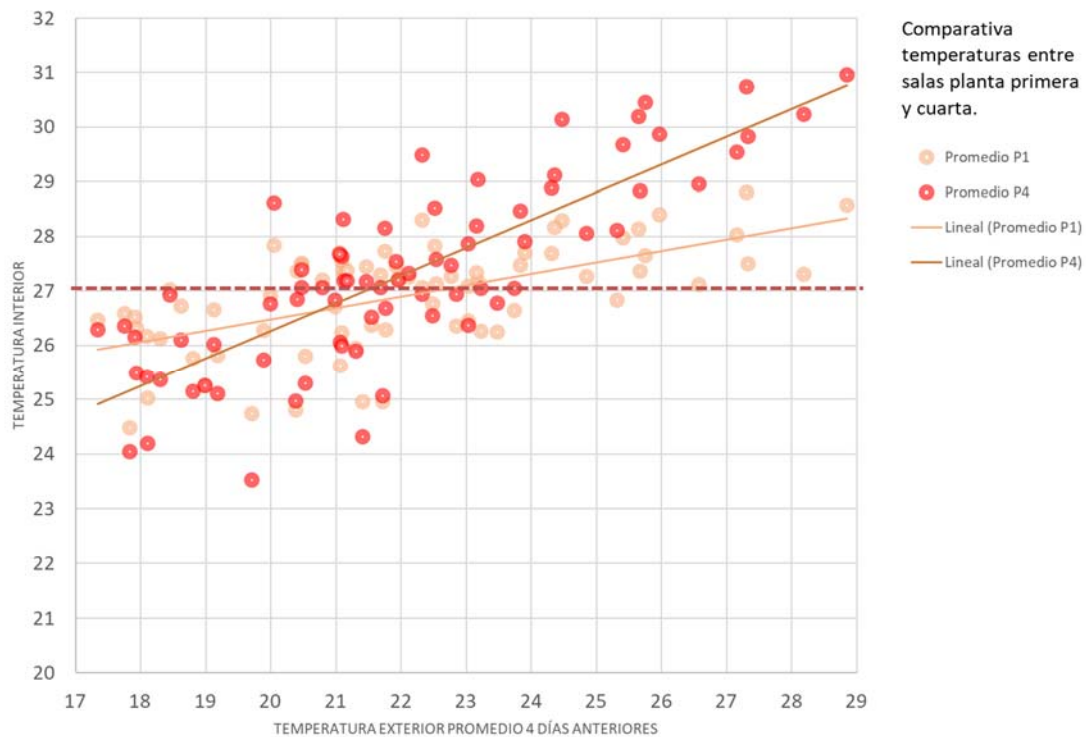


Fig.15. Gráfica comparativa del promedio de la planta P1 en relación a la planta P4 del MN en relación a las temperaturas exteriores (extractado de la figura anterior)

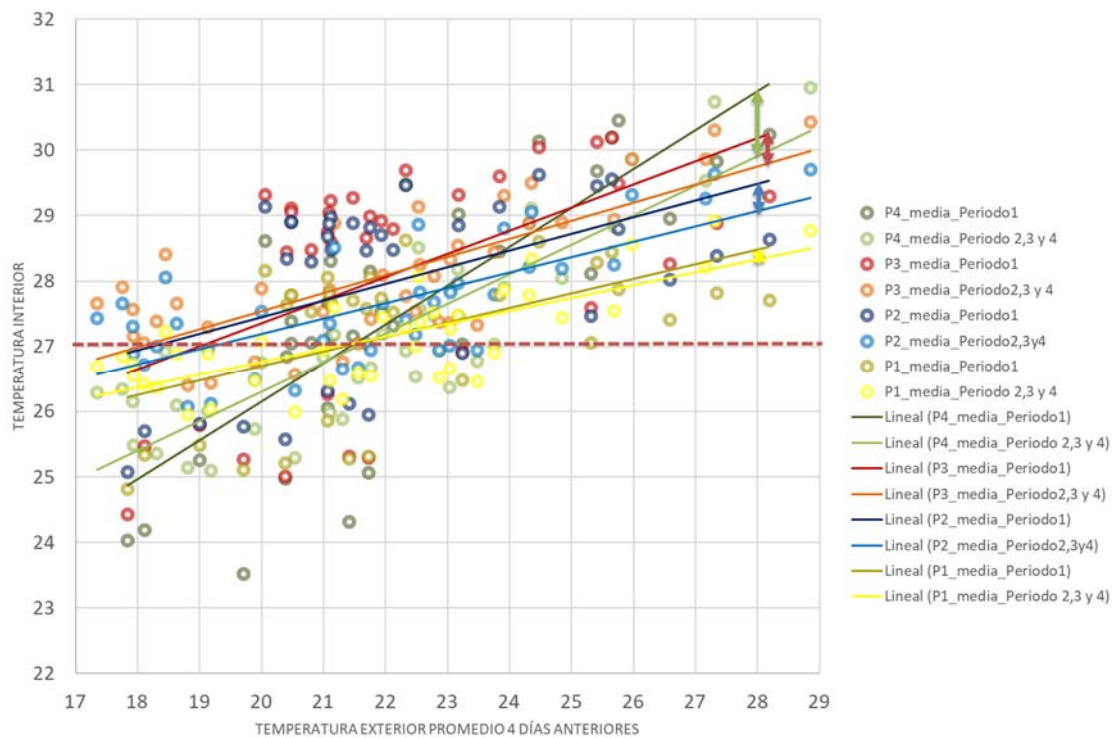


Fig.16. Diferencia por salas entre las plantas P1, P2, P3 y P4, considerando el periodo P1 frente a los periodos P2-P3-P4

4.1.2. Humedad relativa

En los museos, para la exposición y la conservación de las obras de arte, el control de la humedad relativa es incluso más importante que el de la temperatura. En las siguientes gráficas, se adjuntan las HR registradas durante el verano 2019 en la zona expositiva (Fig.17.). Se recomienda la humedad relativa entre 40-50% [4], aunque las limitaciones según la norma española para la conservación de las colecciones están entre el 30-70%. Como ya se ha expuesto, algunas de las zonas más sensibles, tienen humidificadores o deshumidificadores para controlar la humedad relativa (ver localización concreta en apartado 2.2.3). Como se aprecia en la Figura 17, **la humedad relativa está en toda la monitorización de verano en un rango entre 30-70%. Las plantas 1-4 están en general entre 40-50% y la planta baja y sótano están entre 50-60% (alcanzando valores de hasta el 70%)**. En la sala de prehistoria del sótano hay dos deshumidificadores que han estado funcionando todo el verano. Destaca el taller de restauración con los valores más bajos de HR, influenciados por las altas temperaturas que se alcanzan (se verá más adelante que también tiene altas oscilaciones diarias).

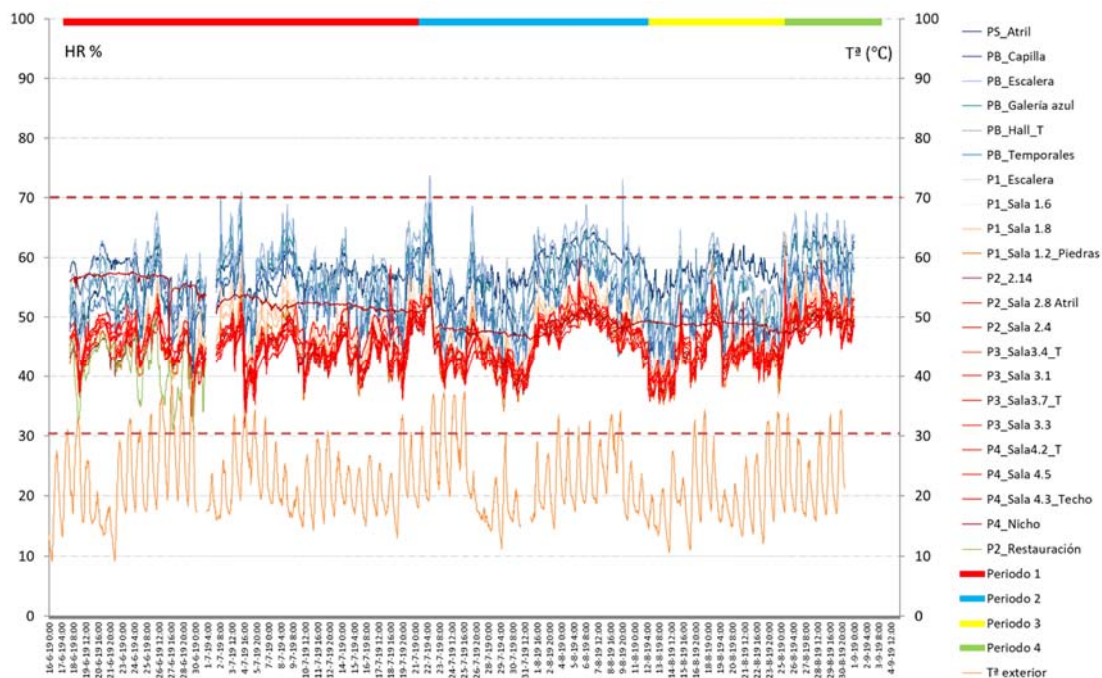


Fig.17. Gráfica de datos de humedad relativa interior de la monitorización general de verano 2019, en zona expositiva (datos diezminutales). Rangos recomendados para la conservación de las colecciones entre 40-50%, rango máximo entre 30-70% de HR

En la siguiente Fig.18, se encuentran las oscilaciones diarias de cada sala, con las limitaciones recomendadas de 5 y 10%. Como se aprecia claramente, las mayores oscilaciones de HR se da en las salas de la planta baja y sótano, y el taller de restauración.

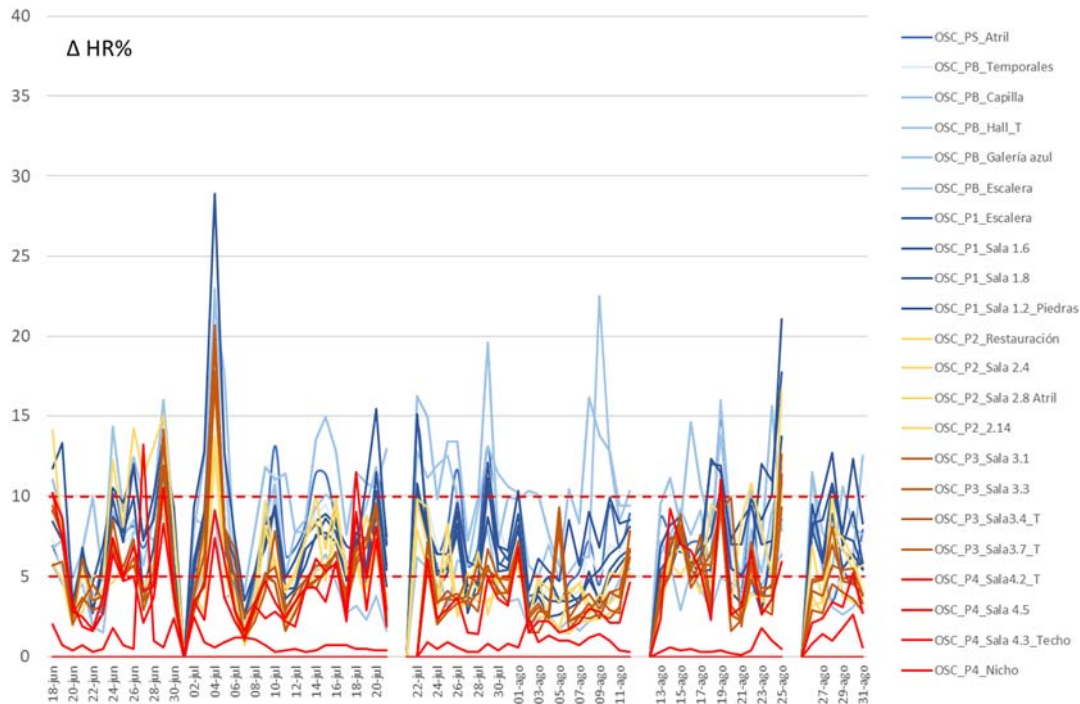


Fig.18. Gráfica con las oscilaciones diarias de cada sala por periodo de todo el verano 2019, con las limitaciones recomendadas de 5-10%

En la siguiente Tabla 6 se recoge el resumen del % de los días con oscilaciones diarias de HR superiores a los límites diarios recomendados de 5% y 10%. Las plantas 3ª y 4ª tienen las menores oscilaciones de HR, aunque en algunos sensores y periodos alcanzan más del 50% de las horas. Las zonas expositivas de la planta baja, la sala de temporales y la galería azul, destacan por estar fuera del margen recomendado del 5% más del 90% en todos los periodos, también teniendo valores altos la zona de prehistoria en planta sótano, la capilla, el taller de restauración, y las salas de planta 1ª. **El taller de restauración y la galería azul** tienen más del 45% de los días de verano, oscilaciones de HR superiores al 10%, mientras que la **sala de temporales** los alcanza el 28% de los días.

Tabla 6. Resumen de % de días por periodo con oscilaciones de humedad relativa diarias, superiores a 5% y a 10%. Nota: el periodo P1 comprende 34 días, el P2 22 días, el P3 13 días, y el P4 6 días. El periodo total se refiere el periodo total monitorizado, por lo que puede haber variaciones en dicho periodo (ver sondas de P2 restauración, P4, sala 4.2, y P4 sala 4.3).

Variable	Nº_OSCDIA_>5%					Nº_OSCDIA_>10%				
	P 1	P 2	P 3	P 4	Total	P 1	P 2	P 3	P 4	Total
Espacio										
PS_Atril	79	73	85	67	77	21	14	8	0	15
PB_Capilla	82	64	77	50	73	15	14	8	0	12
PB_Escalera	36	36	38	33	36	3	0	0	0	1
PB_Galería azul	91	100	92	100	95	52	50	46	33	49
PB_Hall_T	91	100	92	100	95	52	50	46	33	49
PB_Temporales	79	91	92	100	86	18	50	15	33	28
P1_Escalera	88	91	100	100	92	30	14	31	33	26
P1_Sala 1.6	70	50	54	100	62	5	5	15	17	8
P1_Sala 1.8	82	59	85	100	77	15	9	31	33	18
P1_Sala 1.2_Piedras	76	55	92	100	74	9	9	23	0	11
P2_Restauración	77				77	46				46
P2_Sala 2.14	60	41	69	67	56	5	0	15	0	5
P2_Sala 2.8 Atril	50	23	62	67	44	5	0	8	0	3
P2_Sala 2.4	52	32	46	17	42	3	0	8	17	4
P3_Sala3.4_T	58	24	46	17	42	6	0	8	0	4
P3_Sala 3.1	36	24	62	50	38	6	0	8	0	4
P3_Sala3.7_T	40	24	54	0	33	5	0	0	0	2
P3_Sala 3.3	48	24	54	17	40	6	0	15	0	5
P4_Sala4.2_T	36				36	14				14
P4_Sala 4.5	24	10	54	17	25	3	0	8	0	3
P4_Sala 4.3_Techo	35				35	5				5
P4_Nicho	3	0	0	0	1	3	0	0	0	1

Nota: % correspondiente con el periodo de monitorización

Finalmente se aporta los promedios de las oscilaciones de HR diarias, por periodo, de las estancias monitorizadas (Anexo 3).

4.1.3. Concentración de CO₂

En este apartado, se estudia la calidad del aire de la zona expositiva y la zona de oficinas.

Según el RITE “Reglamento de las Instalaciones Térmicas de los Edificios” [3], los edificios distintos de viviendas (así como distintos de almacenes de residuos, los trasteros, los aparcamientos y garajes; y en los edificios de cualquier otro uso, a los aparcamientos y los garajes) dispondrán “de un sistema de ventilación para el aporte del suficiente caudal de aire exterior que evite, en los distintos locales en los que se realice alguna actividad humana, la formación de elevadas concentraciones de contaminantes...”. **Para uso de museo y oficinas, el RITE exige una categoría IDA2**, lo que supone (apartado IT 1.1.4.2.3.):

- Caudal de aire exterior mínimo de 12,5 dm³/s por persona
- Calidad del aire percibido de 1,2dp (método olfativo)
- Una concentración de ppm de CO₂ de 500ppm por encima del nivel exterior (400ppm)
- Para espacios no dedicados a ocupación humana permanente, método indirecto de caudal de aire por unidad de superficie, de 0,83 dm³/(s·m²)

Para la evaluación de la calidad del aire, se han colocado también diferentes sensores de concentración de ppm de CO₂. Este parámetro está directamente relacionado con la ocupación de las personas. Aunque no hay sistemas de renovación de aire y debido al volumen de las salas, **la concentración de CO₂ está por debajo de los máximos recomendados** (cuyo límite es 500ppm por encima de la medida exterior, y cuando no se tienen dichos datos, se suponen 400ppm como valor exterior), como se aprecia a modo de ejemplo, en las Fig.19 y Fig.20. En dichas figuras, se ven las máximas concentraciones en la sonda colocada en recepción, donde se aprecian los momentos de especial afluencia de visitantes, pero nunca superando los valores máximos recomendados. Sin embargo, al no darse una renovación de aire en las salas, se recomienda realizar otros ensayos de calidad del aire interior para medir otros parámetros, como VOCs, PM2.5, PM10, etc. Estas mediciones tampoco tienen en cuenta la “*Antigüedad Media Local del Aire, AMLA*”, de modo que a mayor AMLA mayor probabilidad de que el aire interior esté viciado.

En las oficinas, los trabajadores abren habitualmente las ventanas para ventilar y reducir las temperaturas en verano de modo manual, ya que no hay colecciones que proteger, siendo además la densidad de ocupación baja.

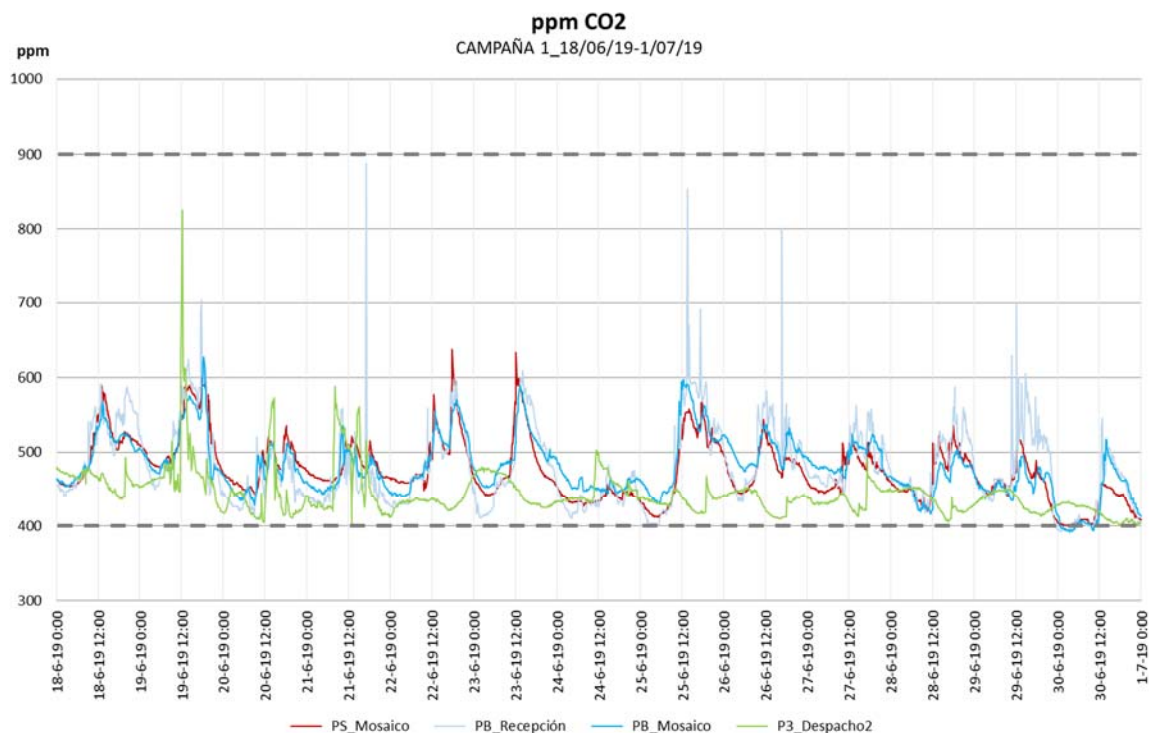


Fig.19. Datos de concentración de ppm de CO₂, para evaluar la calidad del aire interior, de la campaña 1

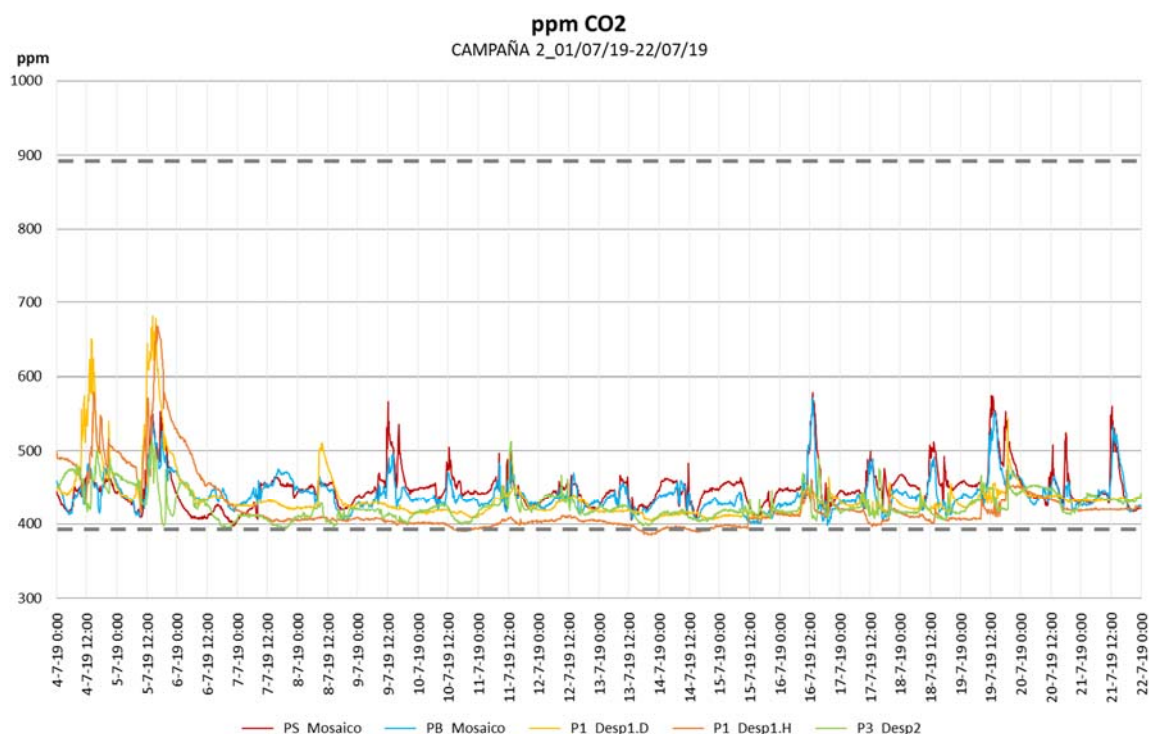


Fig.20. Datos de concentración de ppm de CO₂, para evaluar la calidad del aire interior, de la campaña 2

4.2. EVALUACIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES DE LAS ZONAS DE OFICINAS

Las temperaturas interiores de la zona de oficinas durante el verano 2019 se analizan en este apartado. Estas oficinas están situadas en el ala corta del Museo de Navarra, desde planta 1ª a planta 3ª. Las oficinas están situadas en torno a una escalera de acceso central con tres orientaciones principales: sur, este y norte. En la planta 2ª, parte del espacio en orientación norte se comunica con el ala principal expositivo (salas de pintura mural gótica) y la zona sur-este tiene un taller de restauración, que por sus requerimientos de temperatura y humedad relativa se ha estudiado también en el apartado anterior 4.2. En la 3ª planta, sólo hay oficinas en la orientación norte, puesto que las otras dos orientaciones no tienen huecos, están bajo cubierta inclinada, y tienen uso de almacén. En este apartado también se tiene en cuenta las mediciones en planta baja del salón de actos (aunque apenas tuvo uso en todo el verano) y del taller de didáctica.

Como se ha explicado en el apartado 2.2.3, algunas de las estancias tienen aire acondicionado. En concreto, el salón de actos y el taller de didáctica en planta baja, y las oficinas que dan a sur-este en planta 1ª y 2ª, y en algunas oficinas se usan ventiladores portátiles. A diferencia de los espacios expositivos, en general no hay restricciones para la ventilación natural, y al igual que el resto del museo, ningún hueco tiene sistemas de sombreado por el exterior.

En la Figura 21 se adjunta un resumen de las temperaturas medidas durante todo el verano 2019. Se aprecian sobrecalentamientos puntuales por encima de la categoría III en varios espacios de planta 1ª (biblioteca, despacho NO, y despacho SE). También se aprecia, como tras las olas de calor, las salas reducen su temperatura fácilmente (a diferencia de las salas

expositivas del museo). Se observan picos de temperaturas mínimas, relacionados con la ventilación natural.

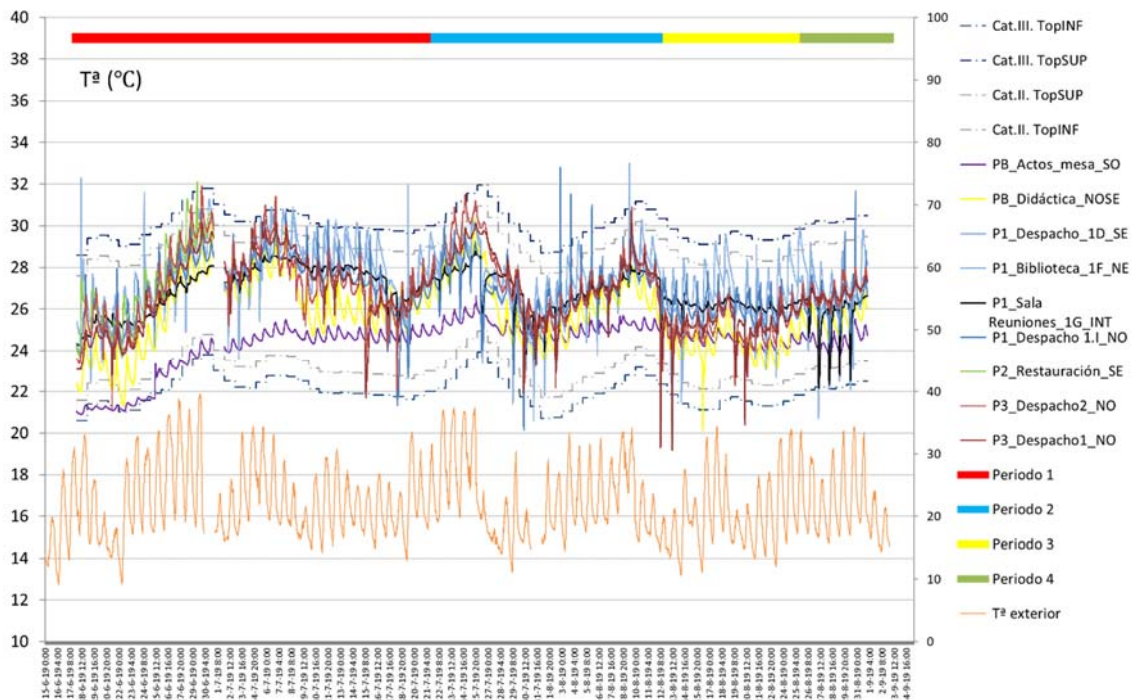


Fig.21. Gráfica general de temperaturas de verano 2019 en las oficinas del Museo de Navarra, con los umbrales adaptativos de la normativa UNE EN 15251 (definidos para las Categorías II y III, como TopSUP y TopINF)

En la tabla 7, se adjuntan los porcentajes de horas del verano, que las oficinas han estado por encima de 27°C, y por encima de los límites adaptativos para el confort de las personas según UNE EN 15251, que son de aplicación para uso de oficinas. No se ha diferenciado por periodos, puesto que no ha habido cambios de uso importantes entre unos y otros. Como se ha estudiado en condiciones de verano, hay oficinas que han podido estar vacías por las vacaciones de los trabajadores, y otras que en determinados momentos han usado AA, por lo que hay que entender estos valores globales como una aproximación.

Tabla 7. Porcentajes de horas (y nº de horas) en las que las oficinas han estado por encima de 27°C y de TopSUP de Cat.II y Cat.III. El salón de actos, la sala de didáctica y el despacho P1_1D tienen AA

	PB_Actos_mesa_SO	PB_Didáctica_NOSE	P1_Despacho_1D_SE	P1_Biblioteca_1F_NE	P1_Sala Reuniones_1G_INT	P1_Despacho 1.I_NO	P2_Restauración_SE	P3_Despacho2_NO	P3_Despacho1_NO
Porcentaje de horas por encima umbrales									
%h > 27°C	0,0	21,7	64,1	49,7	43,9	43,9	44,4	41,5	43,1
%h > CatII	0,0	0,2	10,4	4,8	0,0	2,0	7,0	4,6	1,2
%h > CatIII	0,0	0,0	0,8	0,2	0,0	0,2	0,5	0,8	0,0
Número de horas por encima umbrales									
h>27	0,0	384,7	1139,2	727,2	775,7	779,0	138,7	727,7	755,7
h>CatII	0,0	2,7	184,5	69,8	0,0	35,2	21,8	80,7	21,3
h>CatIII	0,0	0,0	15,0	2,5	0,0	3,3	1,7	13,5	0,2
Total horas evaluadas	1776,2	1776,2	1776,2	1464,0	1776,2	1776,2	312,2	1752,3	1752,3

La sala de actos no se ha utilizado durante el verano, y la sala de didácticas en momentos puntuales de talleres. Todos los despachos y salas de la zona de oficinas tienen más de un 40% de las horas por encima de 27°C, y el despacho P1_1D más del 60%, aunque es el único despacho que tiene AA. **Respecto a los umbrales adaptativos, Despacho 1D y Restauración, y Despacho2_NO y la biblioteca son las que tienen más sobrecalentamientos en relación a la Categoría II, siendo respecto a la categoría III (para edificios existentes, como es el caso) menos del 1% de las horas, por lo que no se puede considerar que haya sobrecalentamiento.** Sin embargo, hay que tener en cuenta, que los umbrales son altos, como se puede ver en la Figura 21.

No se han analizado los rangos de humedad relativa, puesto que en uso oficina son aceptables valores comprendidos entre 30-70% (RITE), no siendo relevantes las oscilaciones de HR en el bienestar de las personas.

4.3. ENCUESTAS

En este apartado se exponen los resultados de las encuestas a visitantes y a trabajadores en condiciones de verano.

4.3.1. Visitantes

El total de encuestas realizadas es 201, desde el 1 de julio hasta el 7 de septiembre. El estudio se ha realizado dividiendo las encuestas en dos periodos:

- Antes del 23 de julio, fecha en la que se cerraron todas las plantas superiores (1ª-4ª, debido al excesivo calor).
- Del 24 de julio al 3 de septiembre incluido, fecha en la que se reabrió el museo.

Del total de encuestas, hay 17 que no tienen fecha, pero debido a la respuesta de insatisfacción en plantas y a la fecha de introducción de datos se ha estimado que 6 de ellas han sido respondidas antes del 23 de julio. Por tanto, hay 11 de las que no se puede determinar si se realizaron antes o después del 23 de julio de 2019, fecha en la que por exceso de calor se cerraron al público las plantas 1ª, 2ª, 3ª y 4ª. Además, hay 11 encuestas realizadas después del 3 de septiembre que no se han tenido en cuenta debido a que el 3 de septiembre se han abierto de nuevo todas las plantas al público. En resumen:

- 56 encuestas hasta 23 de julio de 2019 (situación 1).
- 123 encuestas desde el 24 de julio hasta el 2 de septiembre inclusive (situación 2).
- 11 encuestas después del 3 de septiembre incluido.
- 11 encuestas sin fecha.

Por lo tanto, para el estudio se han analizado por un lado las 56 encuestas realizadas hasta el 23 de julio de 2019 incluido, y por otro las 123 encuestas realizadas entre el 24 de julio y el 2 de septiembre de 2019 inclusive. Por lo tanto, **se han analizado 179 respuestas de visitantes del Museo de Navarra.**

Los visitantes al MN durante julio y agosto 2019 fueron 9.501 (tamaño de población), por lo que se pueden considerar los resultados de la encuesta representativos, con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 8%.

En relación a las preguntas de caracterización del visitante (ver Fig.22), el 40% de los visitantes no indica la nacionalidad, el 40% proviene de España, el 14% del resto de Europa, un 5% de América Latina y un 1% de Asia. El 48% son hombres y el 52% mujeres, y sólo el 14% son menores de 25 años, siendo un 13% mayores de 65 años.

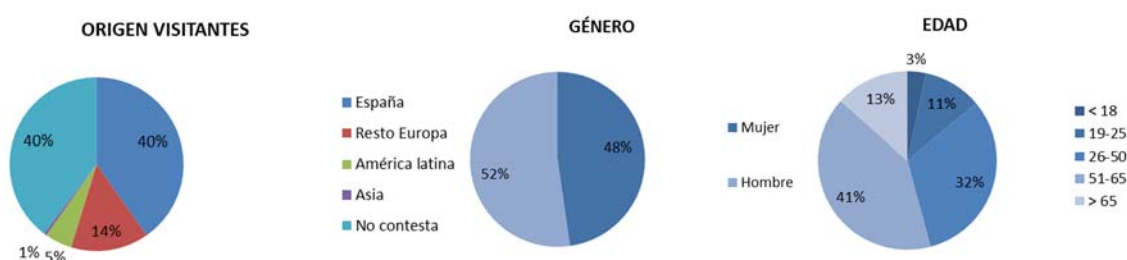


Fig.22. Resumen de respuestas sobre caracterización del visitante, de las encuestas de verano 2019

En relación a la sensación térmica (ver Fig.23), las respuestas son muy diferentes entre los dos periodos. **En el primero, el 84% de los visitantes tienen una sensación térmica de calor** (ligeramente caliente el 11% y caliente o muy caliente el 73%), mientras el 11% neutro y el 5% tienen sensación de frío. En el segundo periodo, la sensación de calor **se reduce al 53%**, mientras que el 46% de los visitantes considera que la sensación térmica es neutra.

En relación a la satisfacción térmica (ver Fig.23), **en el primer periodo, el 68% de los visitantes manifiestan una insatisfacción respecto a la temperatura interior**, el 18% consideran una situación neutra y el **14% está satisfecho**. En el segundo periodo, sólo el 35% de los visitantes manifiestan una insatisfacción respecto a la temperatura interior, el 23% consideran una situación neutra y el **42% está satisfecho**.

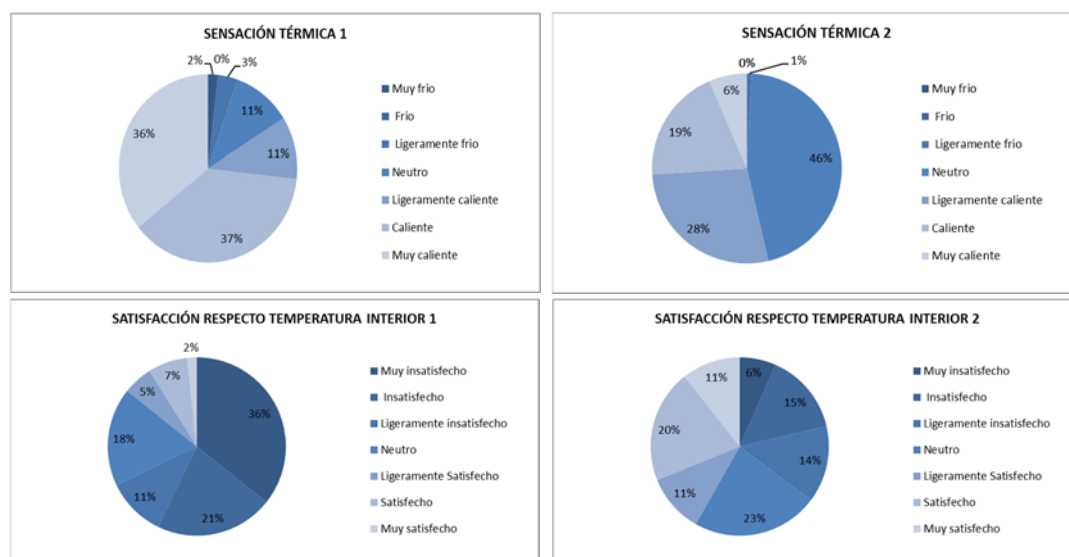


Fig.23. Resumen de respuestas en relación a la sensación térmica entre periodos y al grado de satisfacción

La última pregunta era sobre donde se producía ese discomfort térmico, si era el caso. En el primer periodo, el 52% menciona las plantas 3ª y 4ª como las de mayor discomfort, el 7% menciona exclusivamente la planta 3ª y el 16% la planta 4ª, mientras que el 20% no contesta. Sin embargo, en el segundo periodo, el 43 % considera que no hay discomfort, el 46% no contesta y el 34% manifiesta falta de confort en la planta sótano y/o planta baja. Hay que hacer notar, que varias personas de las encuestas del segundo periodo, se mostraron contrariadas por no poder visitar la totalidad del museo.

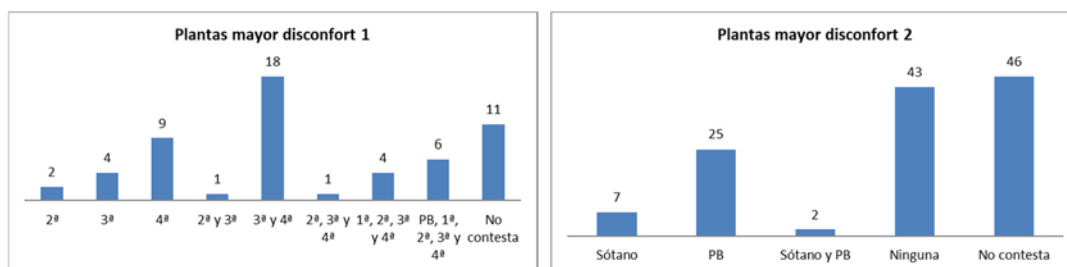


Fig.24. Resumen de respuestas en relación a la pregunta: Cuando usted ha sentido discomfort térmico, ¿en qué planta o espacios del museo ha sido más acusado?

Es resumen, al cerrar las plantas 1ª a 4ª, la sensación de calor se ha reducido del 84% al 53%, y la insatisfacción respecto a las temperaturas se he reducido del 42% al 14%. Las plantas 3ª y 4ª han sido claramente identificadas por los visitantes como las más calurosas, aunque al cerrarse dichas plantas en el segundo periodo, seguía habiendo dicho 53% de sensación calurosa, en ese caso atribuido a las plantas baja y sótano.

4.3.2. Trabajadores

El total de encuestas realizadas es 39. La evaluación térmica del ambiente interior y la evaluación de la calidad del aire se analizan separando los trabajadores en tres grupos (ver Fig.25):

1. Oficina +restauración (10 trabajadores)
2. Vigilantes de sala +visitas guiadas (14 trabajadores)
3. Varios (mantenimiento, vigilante de seguridad, limpieza) (14 trabajadores)

La sensación térmica en verano es caliente o muy caliente para el 80% de los trabajadores de oficinas (8 trabajadores), para el 93% de los vigilantes de sala o visitas guiadas, y El 93% del resto de los trabajadores en oficinas. En relación a la satisfacción con respecto a las temperaturas en su puesto de trabajo el 78% de los trabajadores de las oficinas manifiestan su insatisfacción (en diferente grado), el 93% de los vigilantes de sala y visitas guiadas, y el 58% del resto de trabajadores manifiestan su insatisfacción (en diferente grado) con las temperaturas en su puesto de trabajo en verano.

En resumen, los vigilantes de sala y visitas guiadas son los más insatisfechos con las temperaturas en su puesto de trabajo (93%), seguidos de los de oficinas (78%) y del resto de los trabajadores (58%).

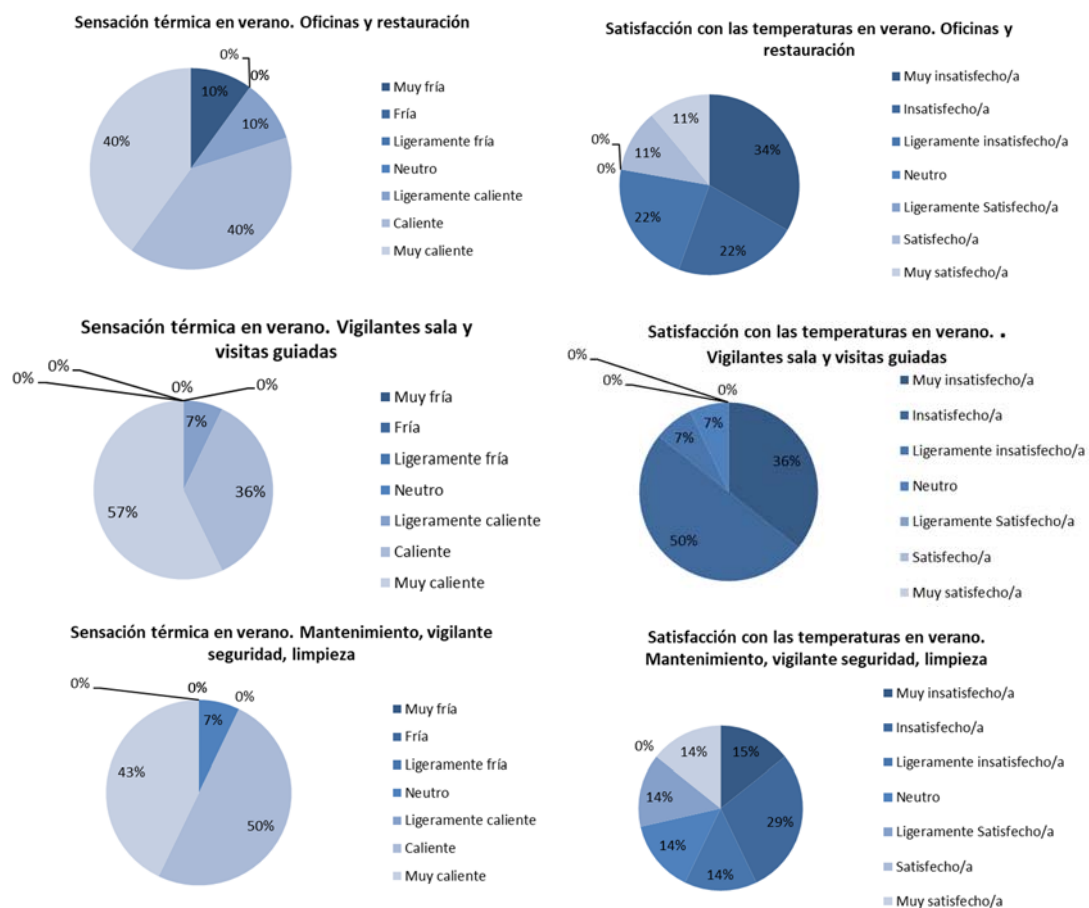


Fig.25. Sensación térmica y satisfacción respecto a las temperaturas, según tipo de trabajo

En la encuesta, además se han preguntado otros parámetros relacionados con el ambiente interior, y los resultados generales se dan en la Fig.26.

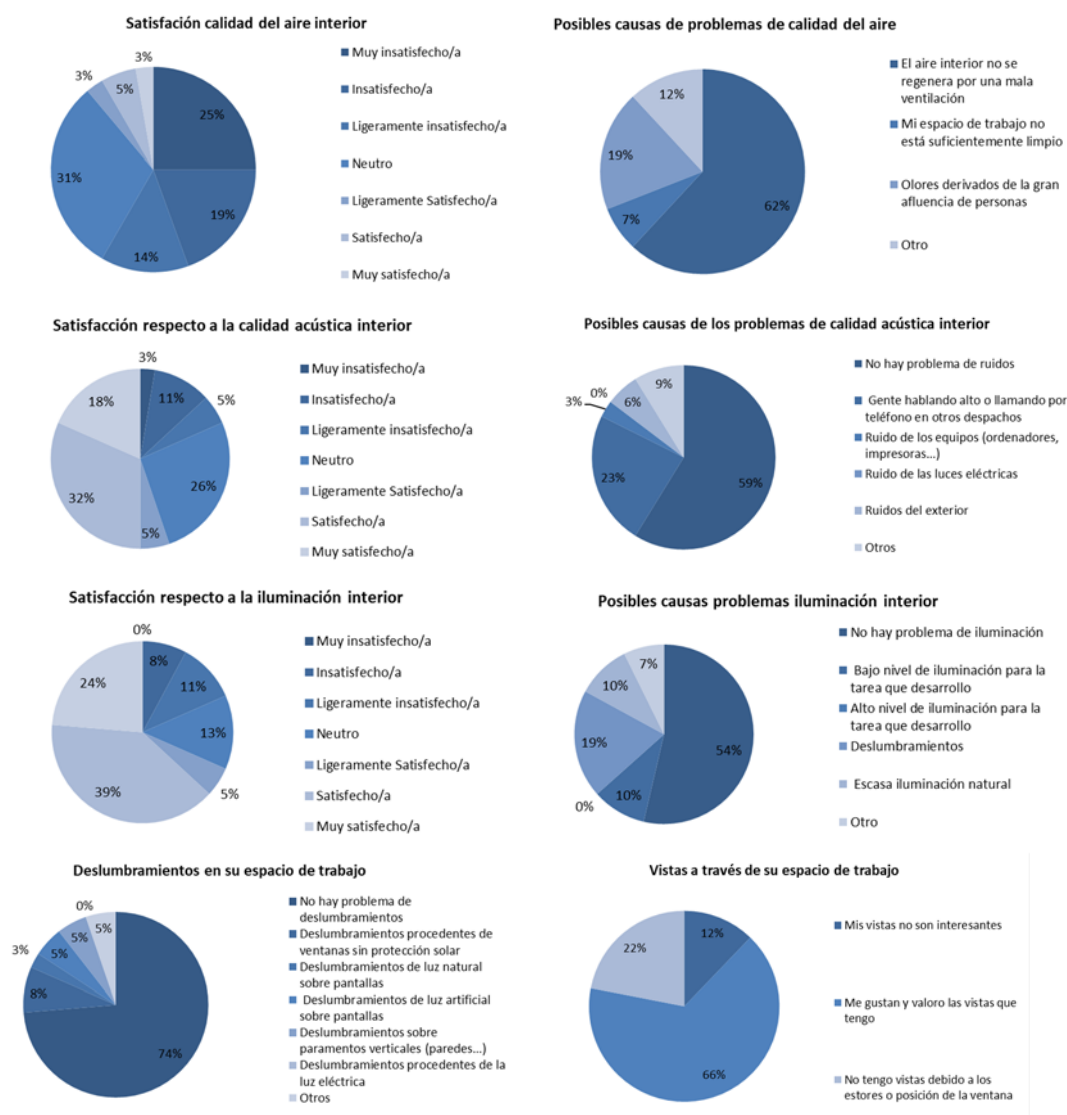


Fig.26. Resumen de satisfacción de distintos parámetros relacionados con el ambiente interior

4.4. EVALUACIÓN DE OTROS PARÁMETROS

Se han instalado distintos “trípodes” para poder evaluar en detalle otros parámetros en distintas salas del museo. Se ha realizado por campañas de 15 días por término medio, que se especifican en el apartado 3.2 de metodología. En general, se trataba de evaluar los siguientes parámetros:

- Evaluación de la inercia térmica. Para ello se midieron temperaturas superficiales de suelo, muros interiores y fachada por su cara interior.
- Estratificación de temperaturas (en general, a 0,10m, a 1,10m, y a 1,70m del suelo, y en techo) y en relación a la fachada (temperatura cercana a hueco y antes de los estores, en relación a la temperatura ambiente).
- Diferencia entre la temperatura ambiente y de globo, para obtener la temperatura operativa (temperatura típica en las evaluaciones de confort).
- Diferencia entre plantas con la misma orientación, o entre salas en la misma planta y con distinta orientación.



Fig.27. Trípodes colocados en las salas de la planta 1 al oeste, y de la planta 4 también al oeste, del 17 de junio al 1 de julio de 2019; y Trípodes colocados en Sala de temporales y en talleres de niños en planta baja, del 22 de julio al 5 de agosto de 2019 (por orden de izqda. a dcha.)

En este apartado, se seleccionan dos de dichos trípodes para explicar dichos conceptos.

4.4.1. CAMPAÑA 1. Trípode en sala de planta 1ª y en orientación oeste

En la Fig.28 se adjuntan los resultados generales del trípode en sala 1ª (sala 1.2) desde el 18/6 al 1/7. En dicha campaña se dio la primera ola de calor y se puede ver la incidencia de las temperaturas exteriores en las temperaturas interiores.

En relación a la estratificación, en esta campaña, se ha podido observar la diferencia media de temperaturas de suelo a techo indicada en la Fig.29, siendo ésta de 0,7°C de 0- 1,7m, y de 1,2°C de 0-4m. La temperatura de globo medida es de media 0,4°C menor que la temperatura ambiente en P1. La temperatura superficial de muro es 0,6°C menor respecto a la temperatura ambiente en P1.

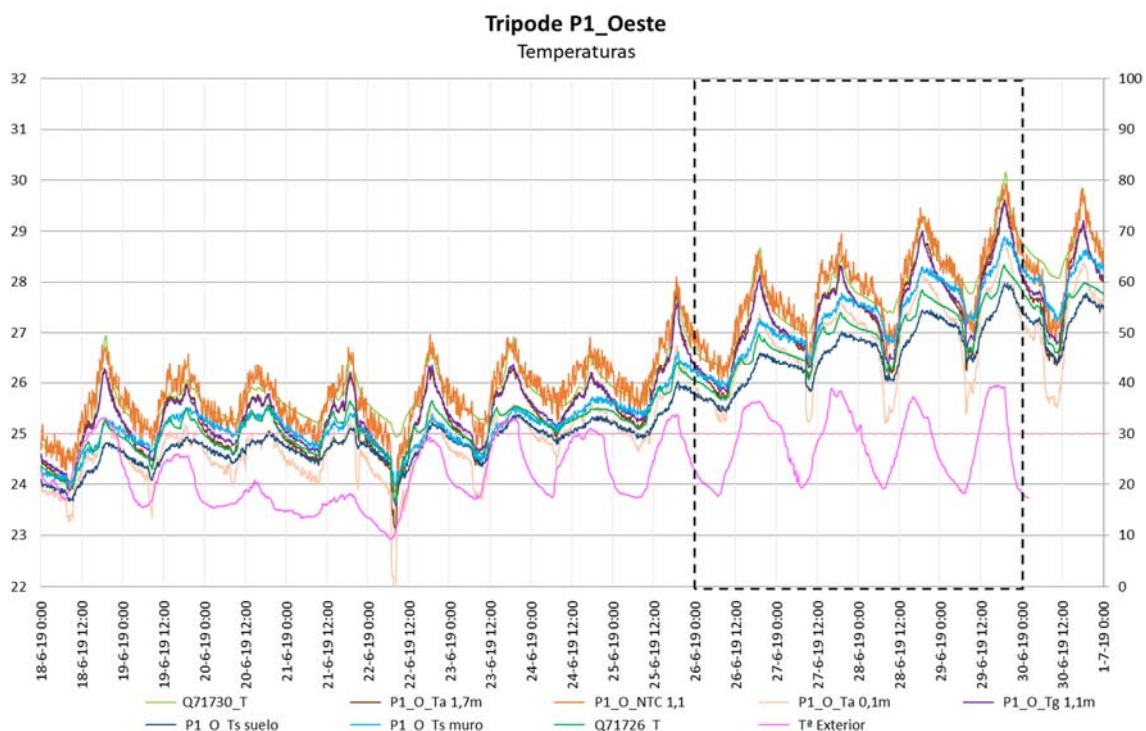


Fig.28. Gráfica de zona 1.2 en planta 1ª en orientación oeste. En la campaña 1 (18/6 al 1/7/2019) (temperatura exterior en eje secundario)

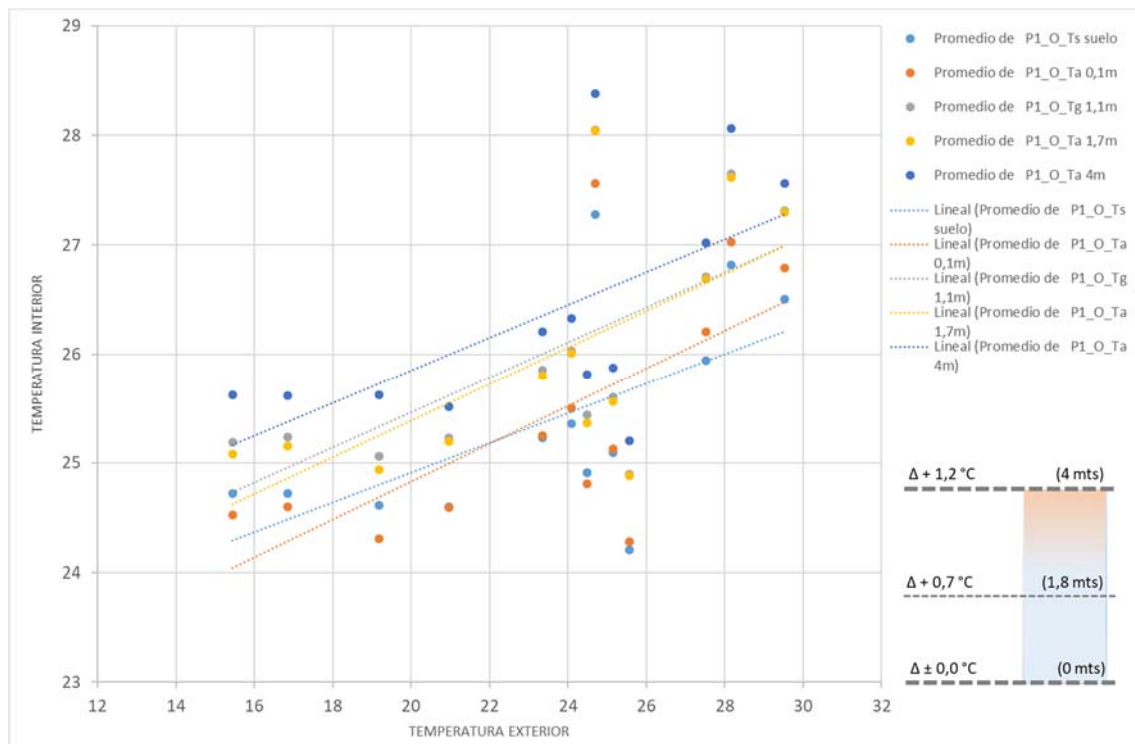


Fig.29. Estratificación de temperaturas en sala de planta 1 orientación oeste (18/6 al 1/7/2019)

4.4.2. Campaña 3. Trípodes en sala de temporales en Planta Baja

En las Fig.30 y Fig31 se puede ver la estratificación de temperaturas (siendo ésta de 1,4-1,8°C de 0-3m, y de 2°C de 0-5m), así como las diferencias entre la temperatura ambiente y la temperatura de globo, así como con las superficiales.

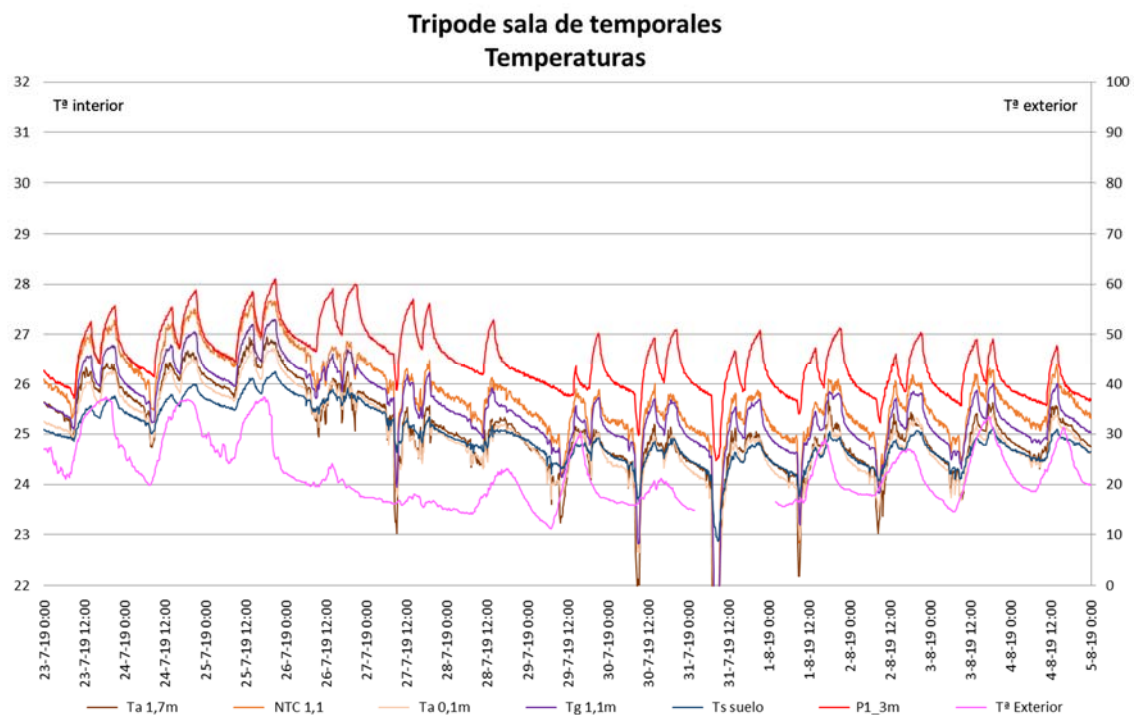


Fig.30. Gráfica de zona de temporales en planta baja, en la campaña 3 (23/7 al 5/8/2019)

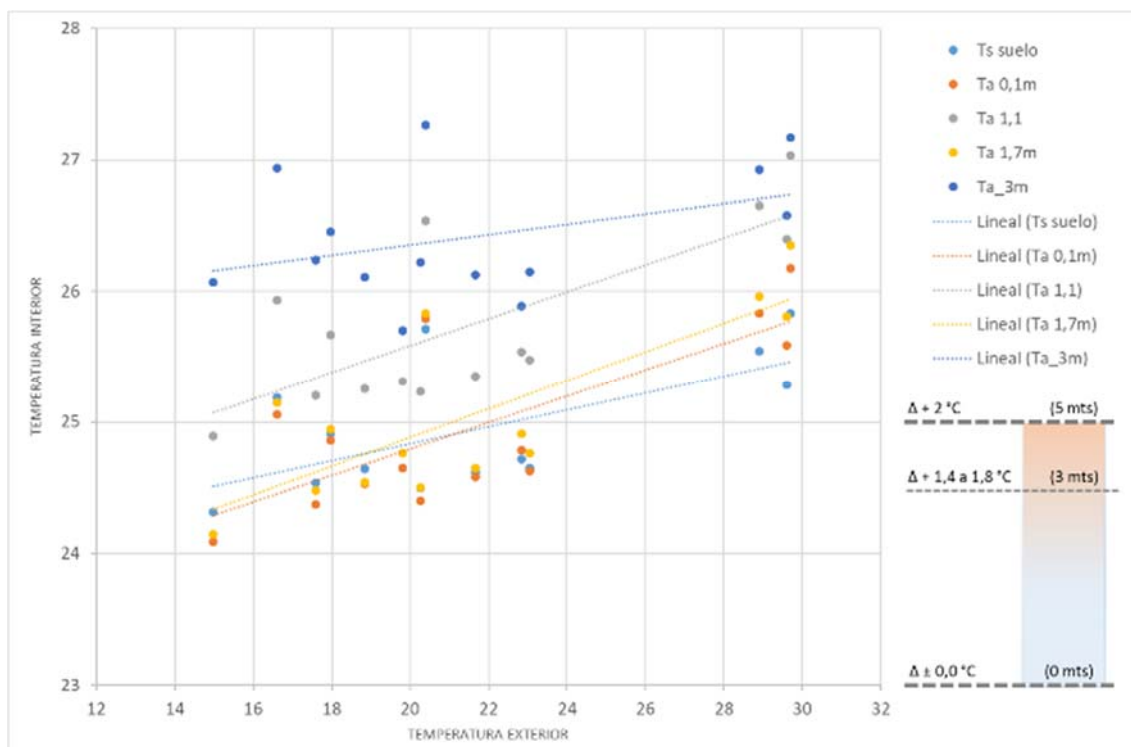


Fig.31. Estratificación de temperaturas en sala de temporales en planta baja (23/7 al 5/8/2019)

5. RESULTADOS. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LOS MESES DE INVIERNO

Al igual que en la monitorización en condiciones de verano, se distingue entre la evaluación de las condiciones ambientales en zonas expositivas y de las zonas de oficinas, por la diferencia de requerimientos (apartado 2.1). En invierno, funciona un sistema de calefacción que se ha descrito en el apartado 2.2.3, con distintos circuitos. Se ha estudiado en noviembre y mediados de diciembre (últimos datos del 16/12/2019) por la duración del presente trabajo, pero convendría seguir midiendo al menos hasta enero 2020 para tener resultados más concluyentes.

5.1. EVALUACIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES DEL ESPACIO EXPOSITIVO

En este apartado, se estudian las condiciones ambientales interiores del espacio expositivo, con sus requerimientos de conservación de las colecciones y de asegurar el confort de las personas. Por ello, se considerarán los valores medidos respecto a los umbrales máximos y mínimos de temperatura y las oscilaciones térmicas diarias, los umbrales máximos y mínimos de HR y las oscilaciones diarias de HR, y los valores de concentración de ppm de CO₂. Estos últimos valores incluyen también los resultados obtenidos en las oficinas.

5.1.1. Temperaturas

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.1, se considera conveniente en condiciones de invierno con uso de calefacción, **una consigna adecuada de temperatura de 21°C (en un rango recomendado de temperaturas entre 18-23°C)**, aunque el CP-0921 da un rango entre 17-27°C.

Como ya se ha explicado, aunque la regulación es manual, hay circuitos de calefacción independientes por cada una de las plantas 1-4, otra para la planta baja, menos para la capilla que tiene su ramal independiente, y otro para prehistoria.

Según la Fig.32, que recoge los datos generales de la campaña de invierno, **los valores son en general superiores a 17°C**. La capilla tiene las temperaturas más bajas de la zona expositiva, con leves oscilaciones térmicas y valores entre 14-17°C, influenciados por su construcción y por la ineficiencia del sistema de calefacción. La entrecubierta de planta 4 (llamado P4-Nicho) no es zona expositiva ni de visita de público, puesto que funciona como almacén y no está calefactada, pero se ha adjuntado en este análisis, ya que hay obras almacenadas. Los valores máximos están en general por debajo de 24°C.

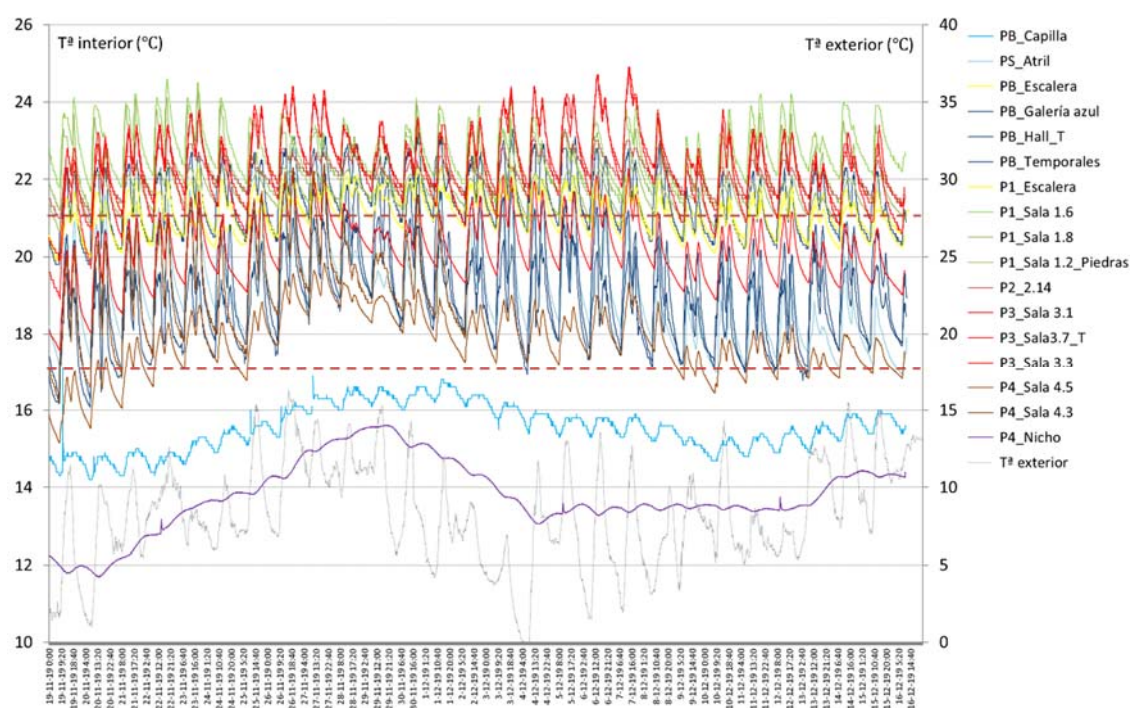


Fig.32. Datos de temperatura interior de la monitorización general de invierno en zona expositiva (datos diezminutales), en relación a los límites recomendados de 21°C (-3°C/+2°C), y la recomendación límite inferior para conservación de colecciones (17°C) (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

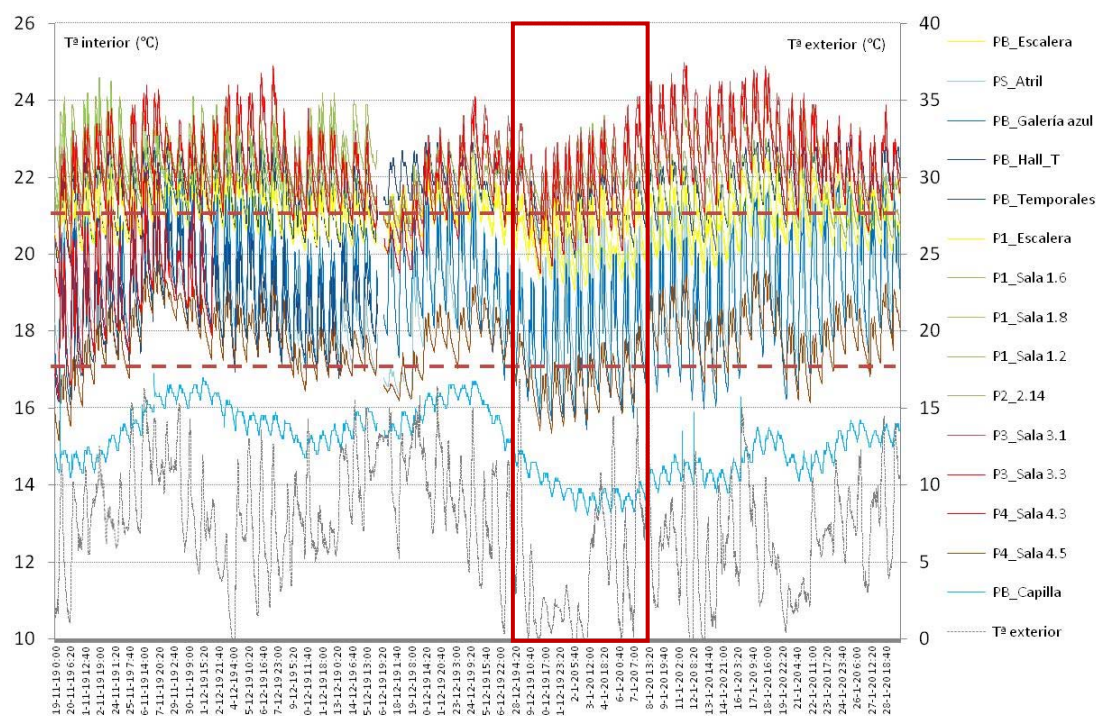


Fig.32.B. (hasta 30 enero) Datos de temperatura interior de la monitorización general de invierno en zona expositiva (datos diezminutales), en relación a los límites recomendados de 21°C (-3°C/+2°C), y la recomendación límite inferior para conservación de colecciones (17°C) (periodo monitorizado: 19-11-2019 al 29-1-2020)

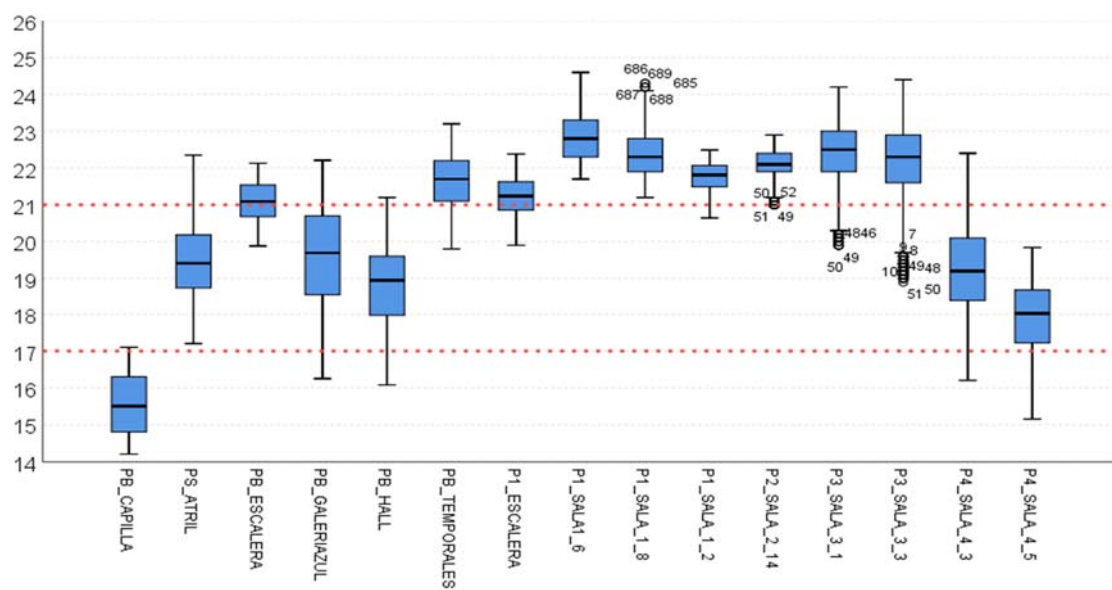


Fig.32.C. Distribución temperaturas interiores en las zonas expositivas. Periodo monitorizado: 19/11/2019-31/01/2020)

En la siguiente gráfica de la Fig.33, se ve más en detalle el funcionamiento de la calefacción, y sus oscilaciones diarias totalmente dependientes del sistema de calefacción. Debido a la inercia del edificio, los rangos de temperaturas diarios son muy similares.

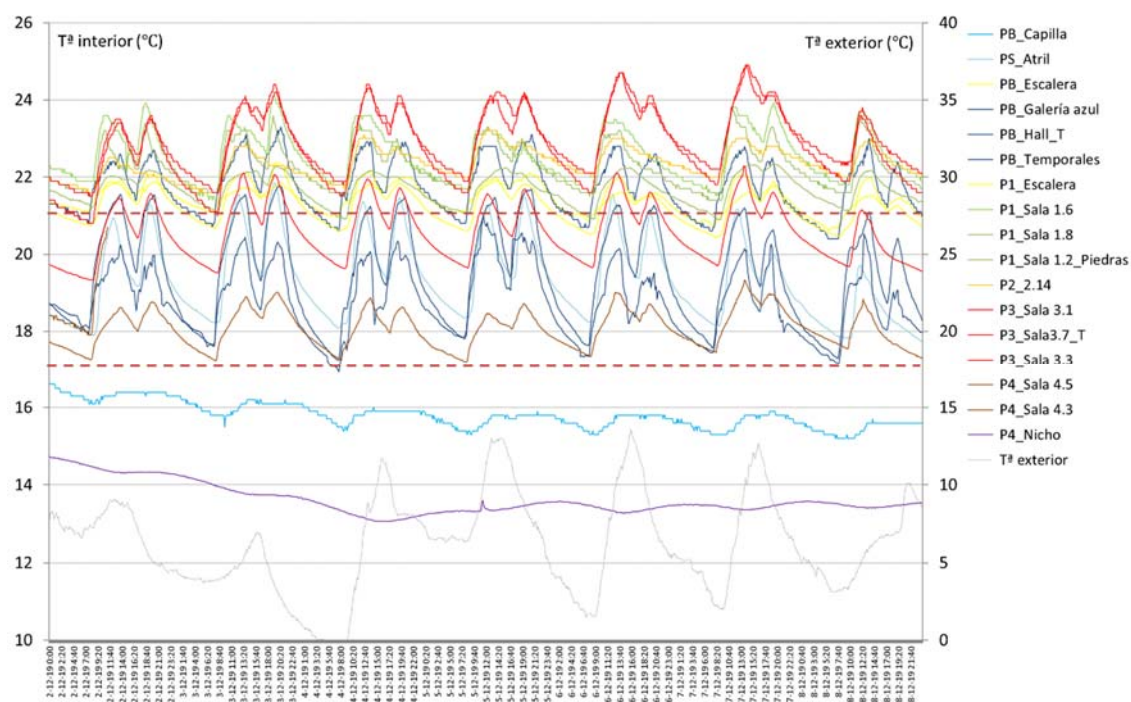


Fig.33. Datos de temperatura interior de la monitorización general de invierno en zona expositiva (datos diezminutales), en relación a los límites recomendados de 21°C (-3°C/+2°C), y la recomendación límite inferior para conservación de colecciones (17°C), de la semana 2-8/12/2019

En la siguiente figura 34 se adjuntan las oscilaciones diarias de temperatura de cada sala. Las oscilaciones en zona expositiva no superan el límite de 5°C diario (salvo puntualmente la zona de escalera en planta 1).

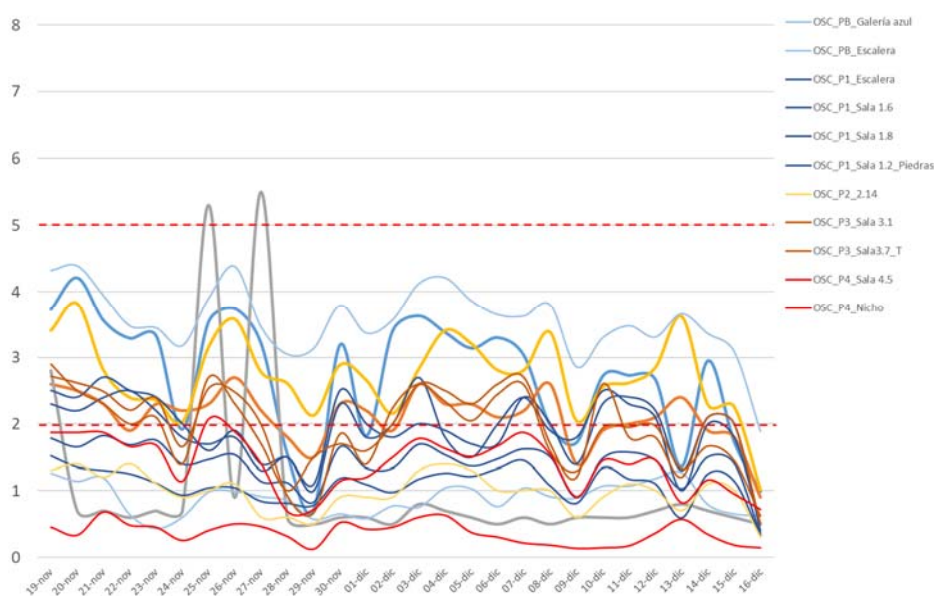


Fig.34. Oscilaciones diarias de temperaturas con la limitación máxima diaria recomendada de 2-5°C (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

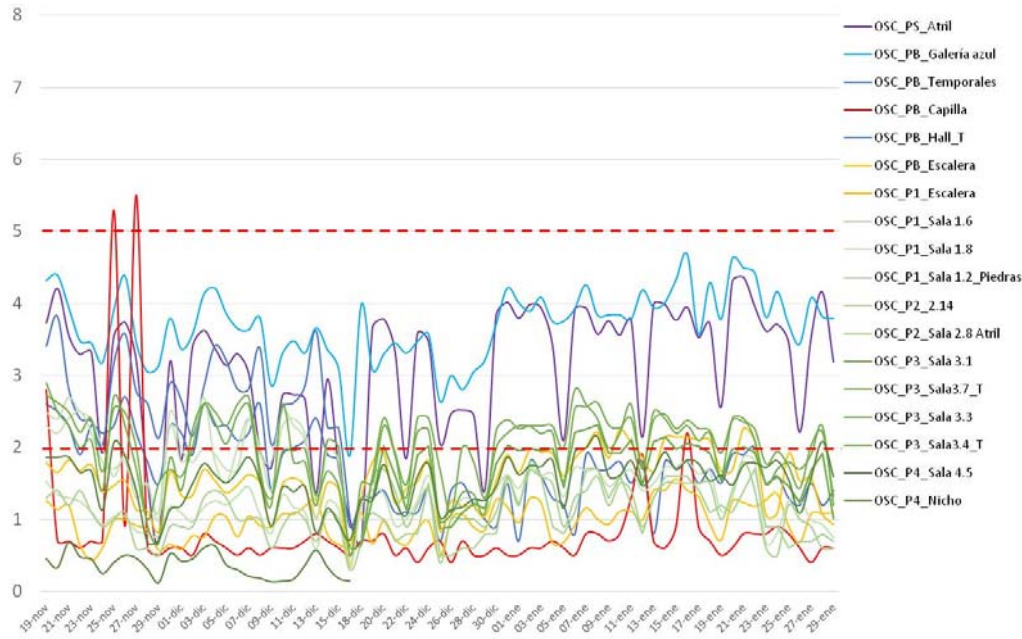


Fig.34.B Oscilaciones diarias de temperaturas con la limitación máxima diaria recomendada de 2-5°C. (Periodo monitorizado: 19/11/2019-31/01/2020)

En la siguiente gráfica de la Fig.35, se resumen las **medias, máximas y mínimas de las oscilaciones diarias de temperaturas de las distintas salas durante la monitorización de invierno 2019**, donde se aprecia el alcance de dichas oscilaciones (máximas y mínimas) y la frecuencia con la que se han dado dichas temperaturas (entre Q2 y Q3 están el 50% de las oscilaciones diarias, marcado en el “*boxplot*”), así como una idea de la estabilidad en los rangos de las temperaturas.

Las oscilaciones mayores se aprecian en espacios expositivos de las plantas sótano y baja, en concreto en la sala de prehistoria (PS_Atril) y en la Galería Azul en Planta baja, pero nunca superan el límite máximo de 5°C diario, por lo que están dentro de los límites establecidos.

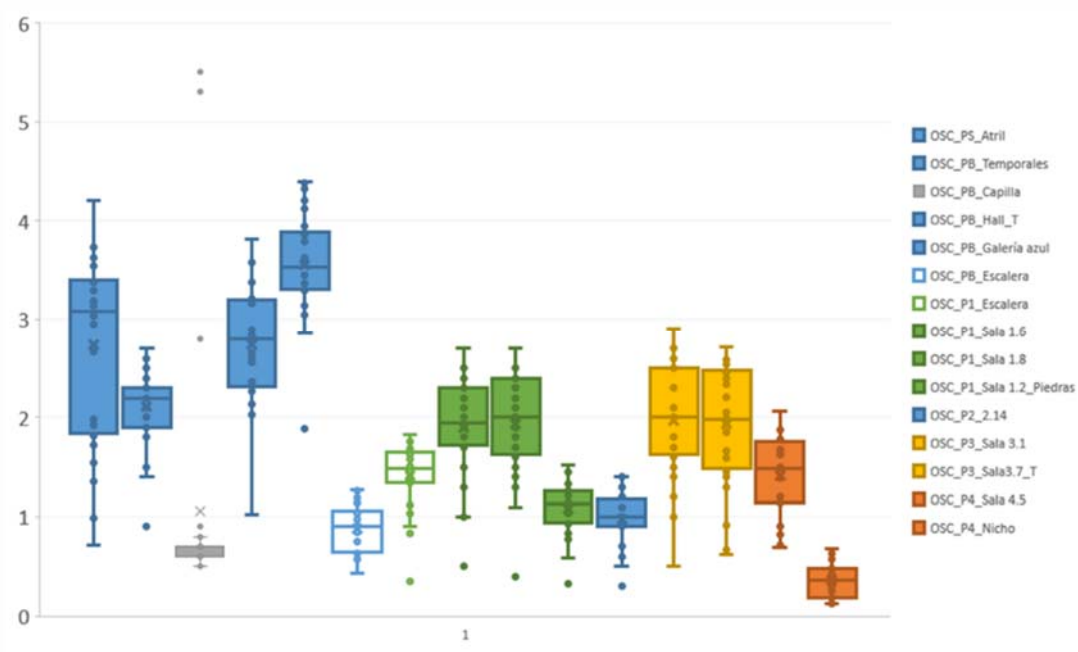


Fig.35. Resumen de oscilaciones diarias de temperaturas de las salas monitorizadas en invierno: medianas, máximas y mínimas de los promedios diarios (cuartil Q2 y Q3, indicando el 50% de las horas), y máximas y mínimas absolutas de la campaña (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

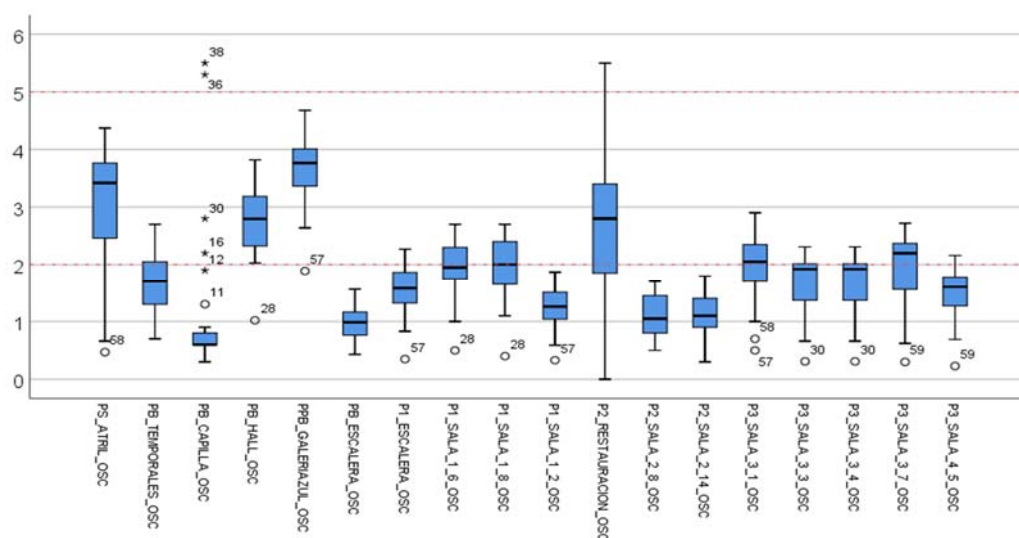


Fig.35.B. Resumen de oscilaciones diarias de temperaturas de las salas monitorizadas en invierno: medianas, máximas y mínimas de los promedios diarios (cuartil Q2 y Q3, indicando el 50% de las horas), y máximas y mínimas absolutas de la campaña. Periodo monitorizado: 19/11/2019-31/01/2020

Finalmente se adjunta la tabla 8, con el porcentaje de días en los que se superan las oscilaciones diarias recomendadas máximas de 2°C y de 5°C. **En la galería azul y en el vestíbulo, el límite de 2°C se supera el 96% de los días, y en prehistoria y en temporales más del 60% de los días de la monitorización.**

Tabla 8. Resumen de % de días con oscilaciones térmicas diarias superiores a 2°C y a 5°C (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

	OSC_PS_Atril	OSC_PB_Temporales	OSC_PB_Capilla	OSC_PB_Hall	OSC_PB_Galería azul	OSC_PB_Escalera	OSC_P1_Escalera	OSC_P1_Sala 1.6	OSC_P1_Sala 1.8	OSC_P1_Sala 1.2	OSC_P2_2.14	OSC_P3_Sala 3.1	OSC_P3_Sala 3.7	OSC_P4_Sala 4.5	OSC_P4_Nicho
Número días con Oscilación mayor 2°C	19	18	3	27	27	0	0	11	11	0	0	13	13	1	0
% días con respecto al periodo por encima 2°C	68	64	11	96	96	0	0	39	39	0	0	46	46	4	0
Número días con Oscilación mayor 5°C	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con respecto al periodo por encima 5°C	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número total días	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28

Tabla 8.B Resumen de % de días con oscilaciones térmicas diarias superiores a 2°C y a 5°C. Periodo monitorizado: 19/11/2019-31/01/2020

	OSC_PS_Atril	OSC_PB_Temporales	OSC_PB_Capilla	OSC_PB_Hall_T	OSC_PB_Galería azul	OSC_PB_Escalera	OSC_P1_Escalera	OSC_P1_Sala 1.6	OSC_P1_Sala 1.8	OSC_P1_Sala 1.2_Piedras	OSC_P2_Sala 2.8 Atril	OSC_P2_2.14	OSC_P3_Sala 3.1	OSC_P3_Sala 3.3	OSC_P3_Sala 3.4_T	OSC_P3_Sala 3.7_T	OSC_P4_Sala 4.5	OSC_P4_Nicho
Número días con Oscilación mayor 2°C	59	18	4	27	70	0	11	11	11	0	0	0	36	12	12	39	3	0
% días con respecto al periodo por encima 2°C	83	25	6	96	99	0	15	39	39	0	0	0	51	28	28	55	4	0
Número días con Oscilación mayor 5°C	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con respecto al periodo por encima 5%	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número total días	71	71	71	28	71	71	71	28	28	71	43	71	71	43	43	71	71	28

5.1.2. Humedad relativa

La humedad relativa en el MN está en valores generales de 40-50%, aunque en algunos momentos algunas salas suben hasta el 60% y otras bajan hasta el 30%, estando todas las salas dentro de los rangos máximos recomendados para museos de 30-70% (ver Fig.36.). La capilla es la que tiene unos valores superiores entre 60-65%, aunque muy constantes (la capilla suele tener dos deshumidificadores, aunque este último año no se han utilizado).

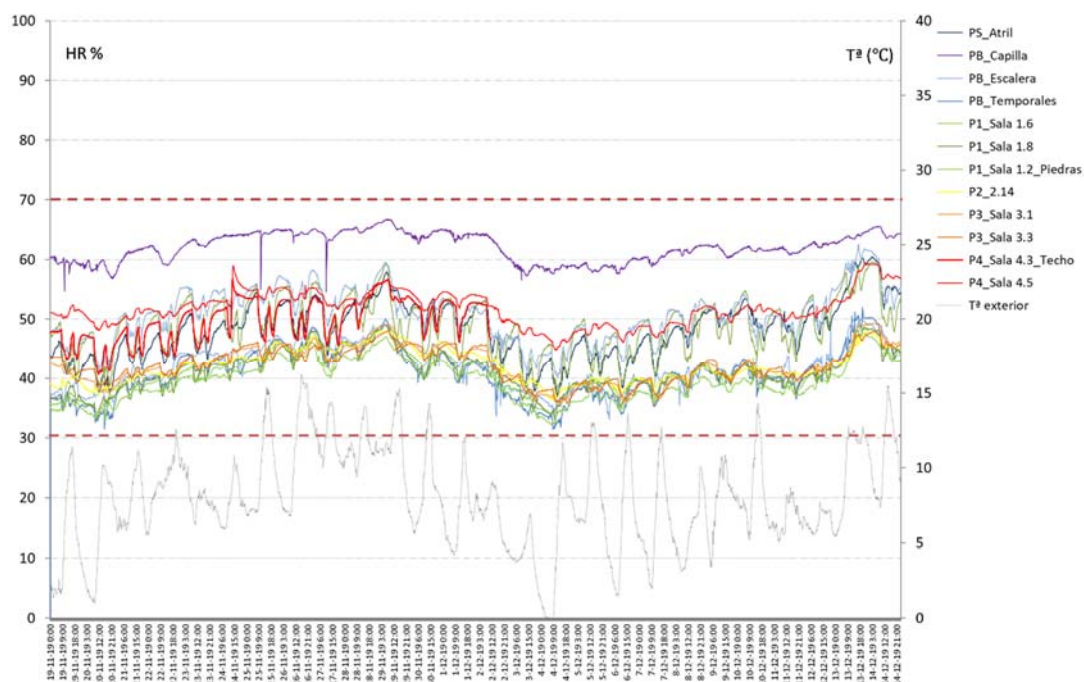


Fig.36. Gráfica de datos de humedad relativa interior de la monitorización general de invierno 2019, en zona expositiva (datos diezminutales). Rangos recomendados para la conservación de las colecciones entre 40-50%, rango máximo entre 30-70% de HR (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

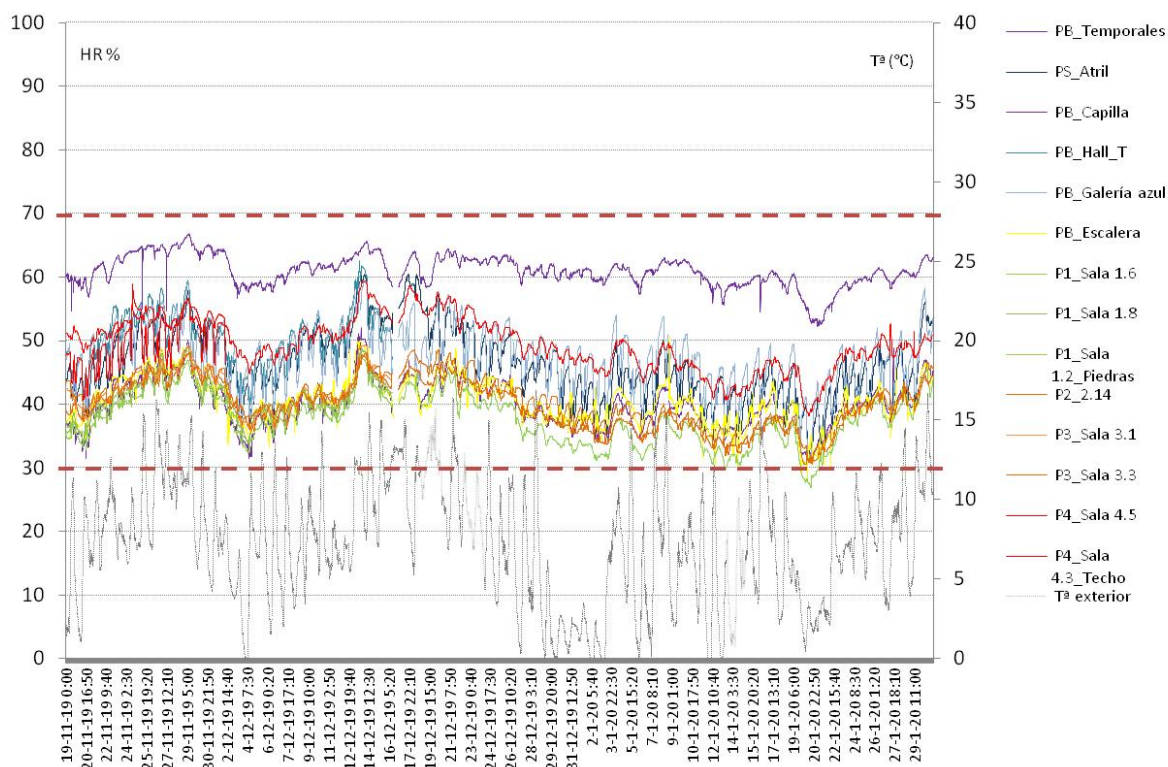


Fig.36.B Gráfica de datos de humedad relativa interior de la monitorización general de invierno 2019, en zona expositiva (datos diezminutales). Rangos recomendados para la conservación de las colecciones entre 40-50%, rango máximo entre 30-70% de HR. Periodo monitorizado: 19/11/2019-31/01/2020

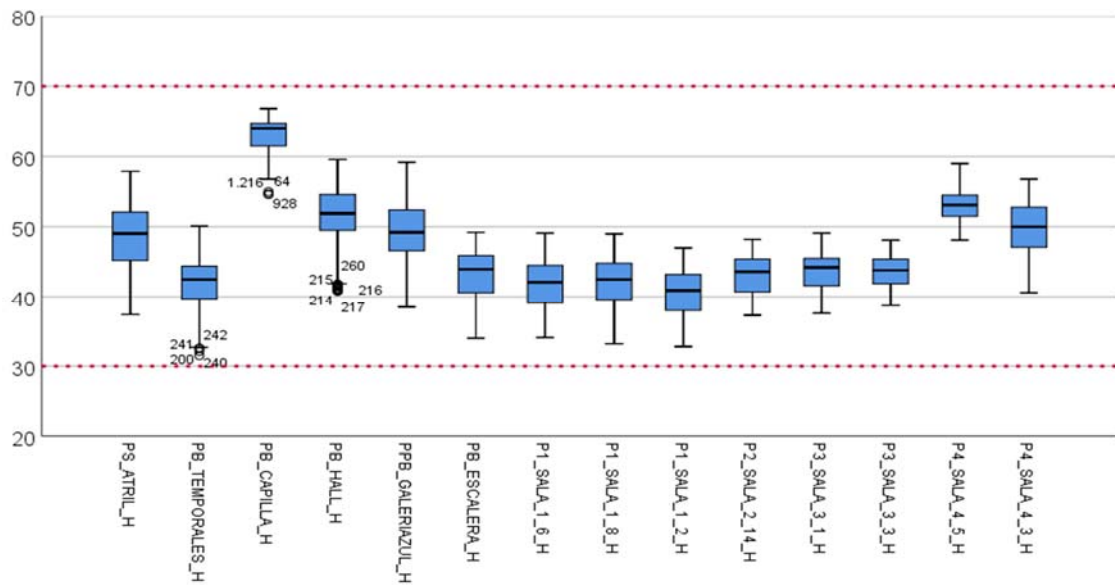


Fig.36.C. Distribución de valores de humedad relativa de las zonas expositivas monitorizadas. Periodo (19/11/2019-31/01/2020)

En la siguiente Fig.37, se adjuntan las oscilaciones diarias de humedad relativa, con las limitaciones recomendadas de la normativa del 5% y del 10%.

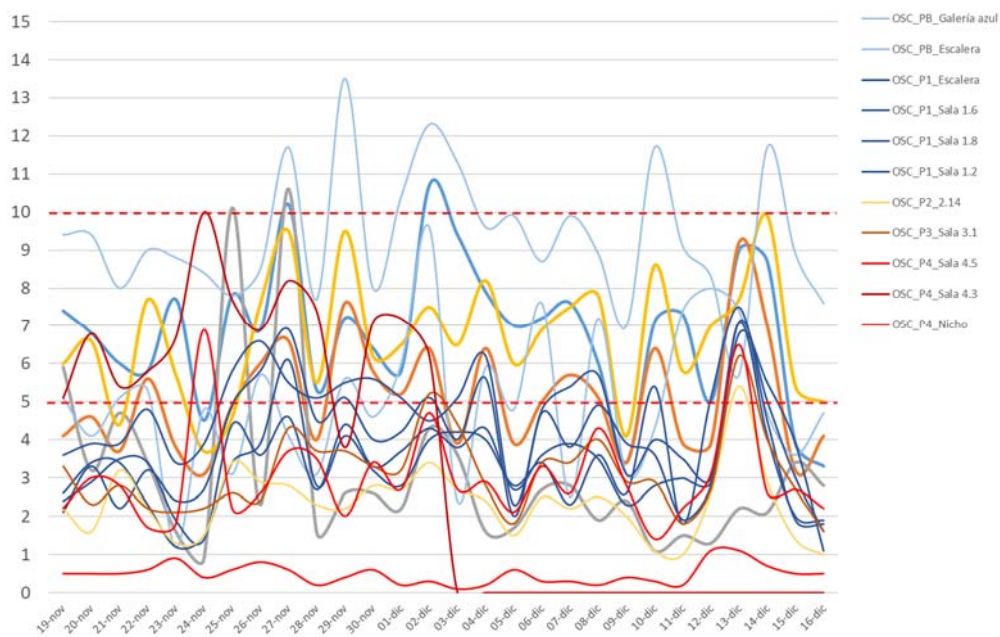


Fig.37. Gráfica con las oscilaciones diarias de la campaña de invierno 2019, con las limitaciones recomendadas de 5-10% (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

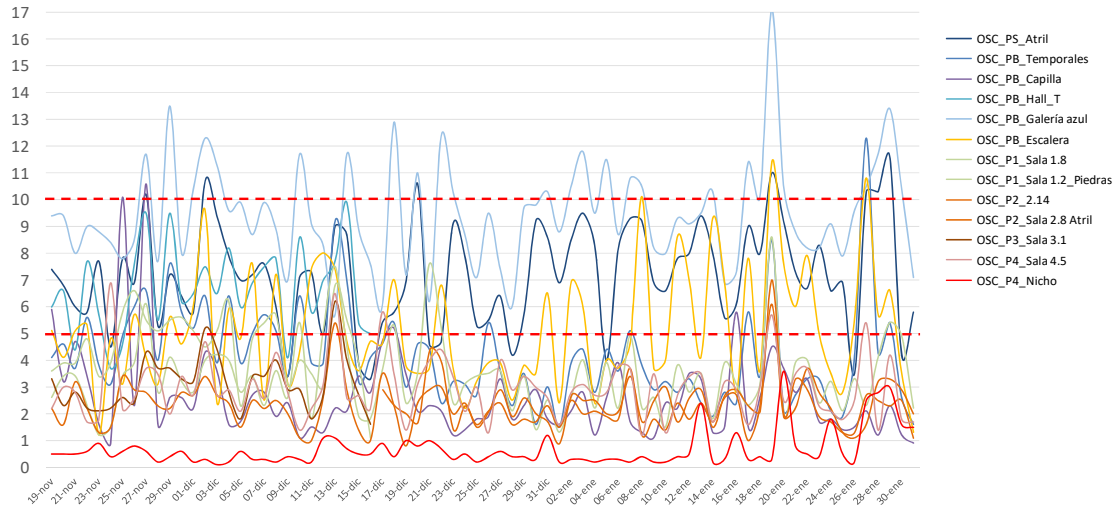


Fig.37.B. Gráfica con las oscilaciones diarias de la campaña de invierno 2019, con las limitaciones recomendadas de 5-10%. Periodo (19/11/2019-31/01/2020)

En la siguiente tabla 9 se recoge el resumen del % de los días con oscilaciones diarias de HR superiores a los límites diarios recomendados de 5% y 10%. Al igual que sucede en condiciones de verano, las mayores oscilaciones de HR en los espacios expositivos se dan en Prehistoria (PS_Atril) en PS y en la Galería Azul, superando más del 5% de oscilación de HR la primera más del 80% de las horas, y la segunda el 100% de las horas. Superan más del 45% de las horas el 5% de HR, la sala de temporales, y las salas 1.8 y 4.3 (en planta 1ª y 4ª). El 10% de oscilación en HR se supera el 25% de los días en la galería Azul, y el 7% de los días en Prehistoria y en la Capilla (estas dos últimas en general, funcionan con deshumidificadores).

Tabla 9. Resumen de % de días con oscilaciones de humedad relativa diarias, superiores a 5% y a 10%. (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

	OSC_PS_Atril	OSC_PB_Temporales	OSC_PB_Capilla	OSC_PB_Hall	OSC_PB_Galería azul	OSC_PB_Escalera	OSC_P1_Escalera	OSC_P1_Sala 1.6	OSC_P1_Sala 1.8	OSC_P1_Sala 1.2	OSC_P2_2.14	OSC_P3_Sala 3.1	OSC_P3_Sala 4.3	OSC_P4_Sala 4.5	OSC_P4_Nicho
Número días con Oscilación mayor 5%	23	13	3	23	28	13	1	6	13	4	1	2	13	2	0
% días con respecto al periodo por encima 5%	82	46	11	82	100	46	4	21	46	14	4	7	46	7	0
Número días con Oscilación mayor 10%	2	0	2	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con respecto al periodo por encima 10%	7	0	7	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número total días	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28

Tabla 9.B. Resumen de % de días con oscilaciones de humedad relativa diarias, superiores a 5% y a 10%.
Periodo monitorizado: 19/11/2019-31/01/2020

	OSC_PS_Atril	OSC_PB_Temporales	OSC_PB_Capilla	OSC_PB_Hall_T	OSC_PB_Galería azul	OSC_PB_Escalera	OSC_P1_Escalera	OSC_P1_Sala 1.6	OSC_P1_Sala 1.8	OSC_P1_Sala 1.2	OSC_P2_2.14	OSC_P2_Sala 2.8	OSC_P3_Sala 3.1	OSC_P3_Sala 4.3	OSC_P4_Sala 4.5	OSC_P4_Nicho
Número días con Oscilación mayor 5%	63	20	5	23	74	32	1	6	13	9	2	1	2	13	5	0
% días con respecto al periodo por encima 5%	85	27	7	82	100	74	4	21	46	12	3	2	7	46	7	0
Número días con Oscilación mayor 10%	7	1	2	0	26	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con respecto al periodo por encima 10%	9	1	3	0	35	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número total días	74	74	74	28	74	74	28	28	28	74	74	46	28	28	74	74

Finalmente se aportan los promedios de las oscilaciones de HR diarias de las estancias monitorizadas (Fig.37.C y Fig.37.D).

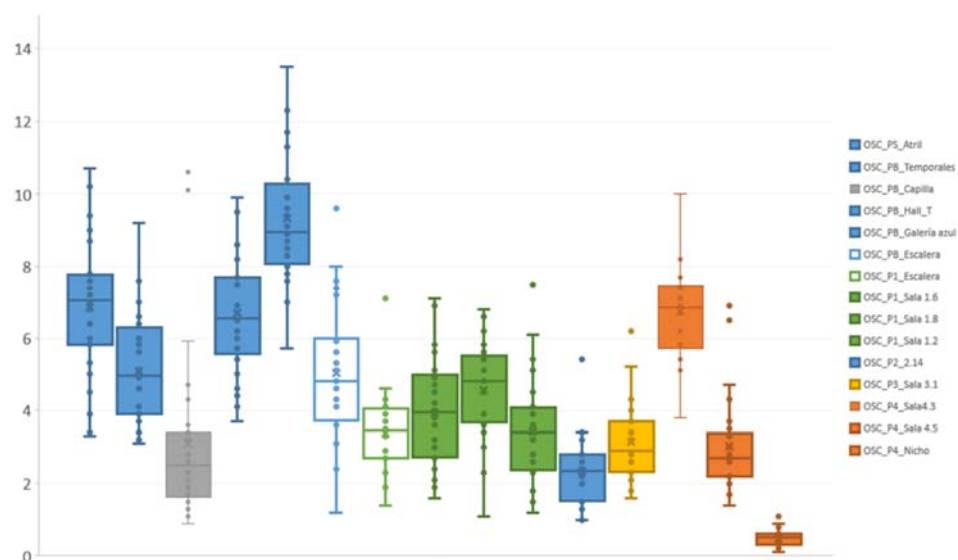


Fig.37C. Resumen de oscilaciones diarias de humedad relativa de las salas monitorizadas en invierno: medianas, máximas y mínimas de los promedios diarios (cuartil Q2 y Q3, indicando el 50% de las horas), y máximas y mínimas absolutas de la campaña (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

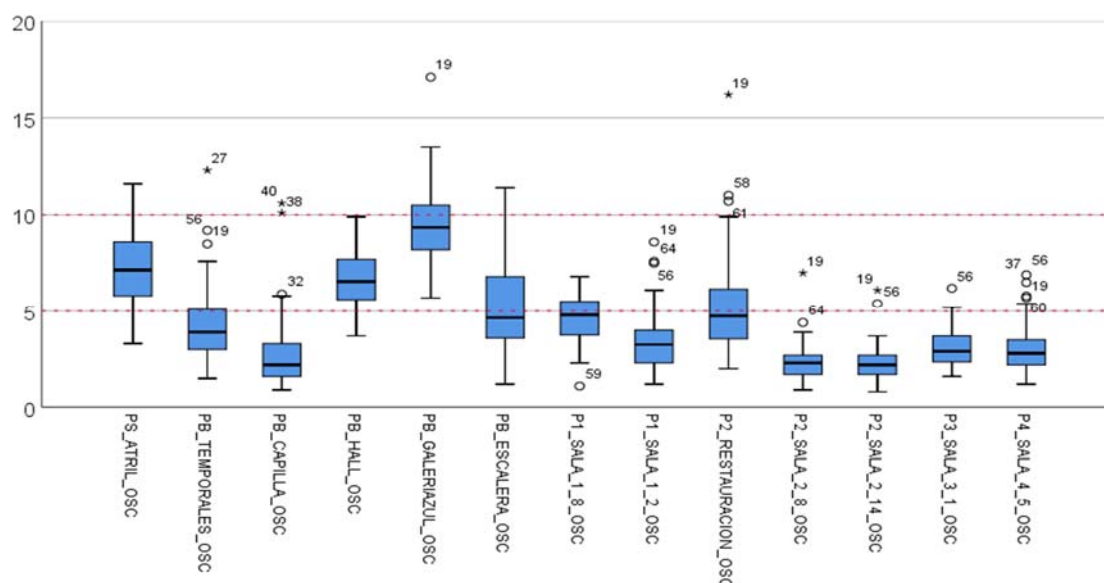


Fig.37.D Resumen de oscilaciones diarias de humedad relativa de las salas monitorizadas en invierno: medianas, máximas y mínimas de los promedios diarios (cuartil Q2 y Q3, indicando el 50% de las horas), y máximas y mínimas absolutas de la campaña. Periodo (19/11/2019-31/01/2020)

5.1.3. Concentración de CO₂

En este apartado, **se estudia la calidad del aire de la zona expositiva y la zona de oficinas.**

El umbral recomendado es de 900ppm de CO₂, y está vinculado a la ocupación de las personas. En la primera gráfica, se adjunta una visión general de distintas salas seleccionadas (ver Fig.38.). **En general, no se supera el rango recomendado de concentración de ppm de CO₂ salvo en picos puntuales** (que llegan a los 1400ppm), **principalmente en despachos** (debido al menor volumen en relación a las salas), aunque también en algunas salas del museo (sala de P4, 4.3, temporales en PB o prehistoria en PS), aunque baja a valores de 450ppm al final del día. En la Fig.39. se observa su evolución más en detalle a lo largo de una semana.

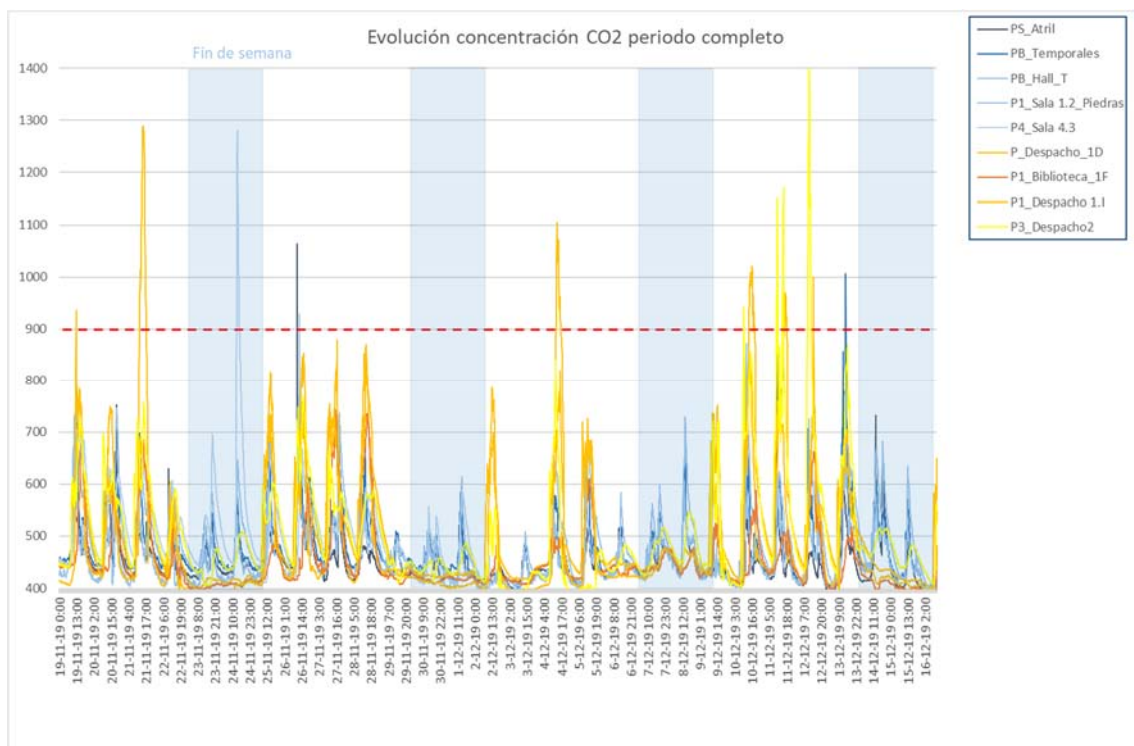


Fig.38. Datos de concentración de ppm de CO₂, para evaluar la calidad del aire interior de la campaña de monitorización de invierno 2019 (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

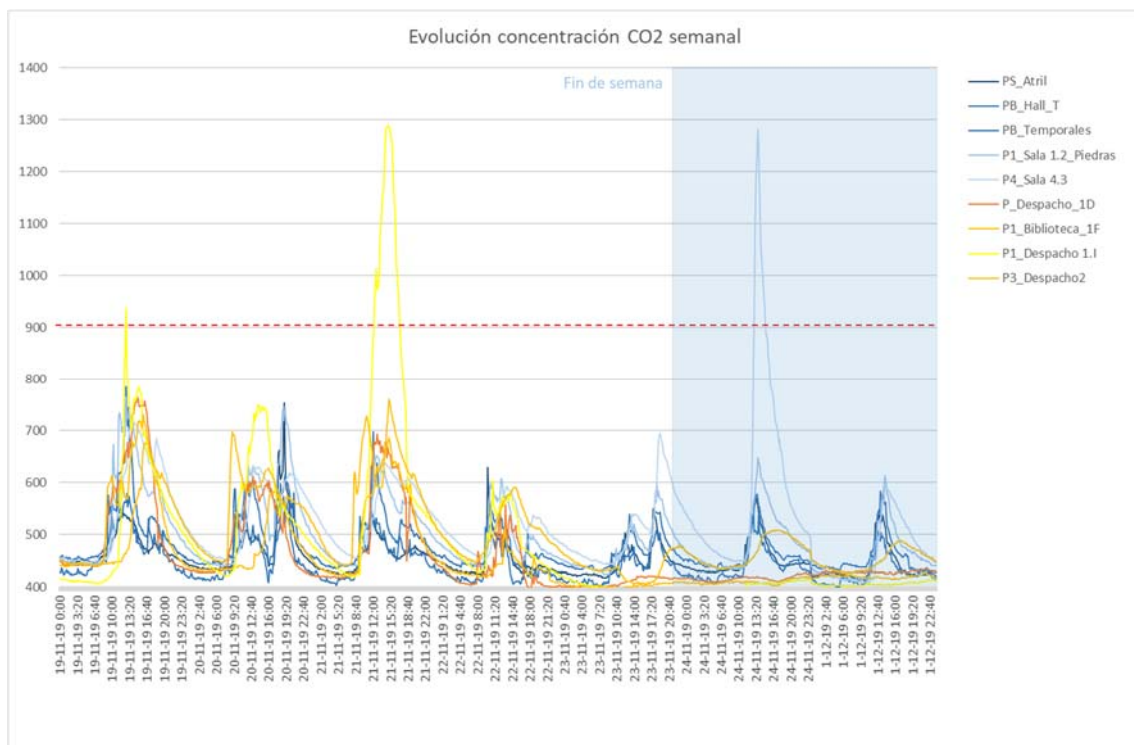


Fig.39. Datos de concentración de ppm de CO₂, para evaluar la calidad del aire interior de una semana seleccionada de la campaña de monitorización de invierno (19/11-1/12/2019)

Finalmente se adjuntan los boxplot con datos medios, máximos y mínimos de la concentración de ppm de CO₂ (ver Fig.40).

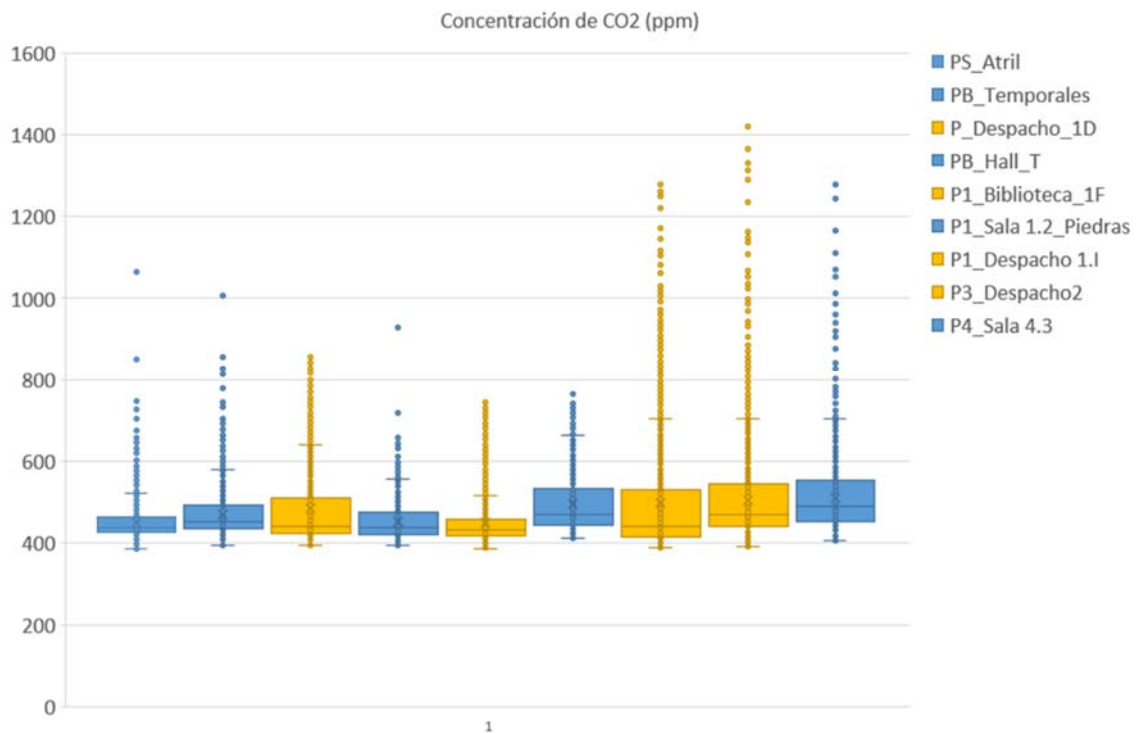


Fig.40. Resumen de los porcentajes de ppm de CO₂ de todas las salas monitorizadas en invierno: medianas, máximas y mínimas de los promedios diarios (cuartil Q2 y Q3, indicando el 50% de las horas), y máximas y mínimas absolutas de la campaña

5.2. EVALUACIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES DE LAS ZONAS DE OFICINAS

En este apartado, se evalúan las condiciones ambientales de la zona de oficinas, el salón de actos y el aula de didáctica. Se adjuntan todos los datos de monitorización, en una gráfica general de las condiciones de temperatura interior, donde se indican los rangos recomendados de 21-23°C (Fig.41.). La estancia con un régimen menor de temperaturas es el salón de actos, con un uso muy esporádico. **La biblioteca es la que puntualmente alcanza menores temperaturas (de hasta 16°C). Los despachos a nor-oeste son los que alcanzan mayores temperaturas, especialmente el despacho de la planta 3ª, que supera los 26°C.** Se puede observar un gradiente de temperatura en los despachos, que podría ser debido a la mala regulación del sistema de calefacción (con un sólo ramal para todas las oficinas, y sin válvulas por radiador, etc., que hagan posible una mejor regulación).

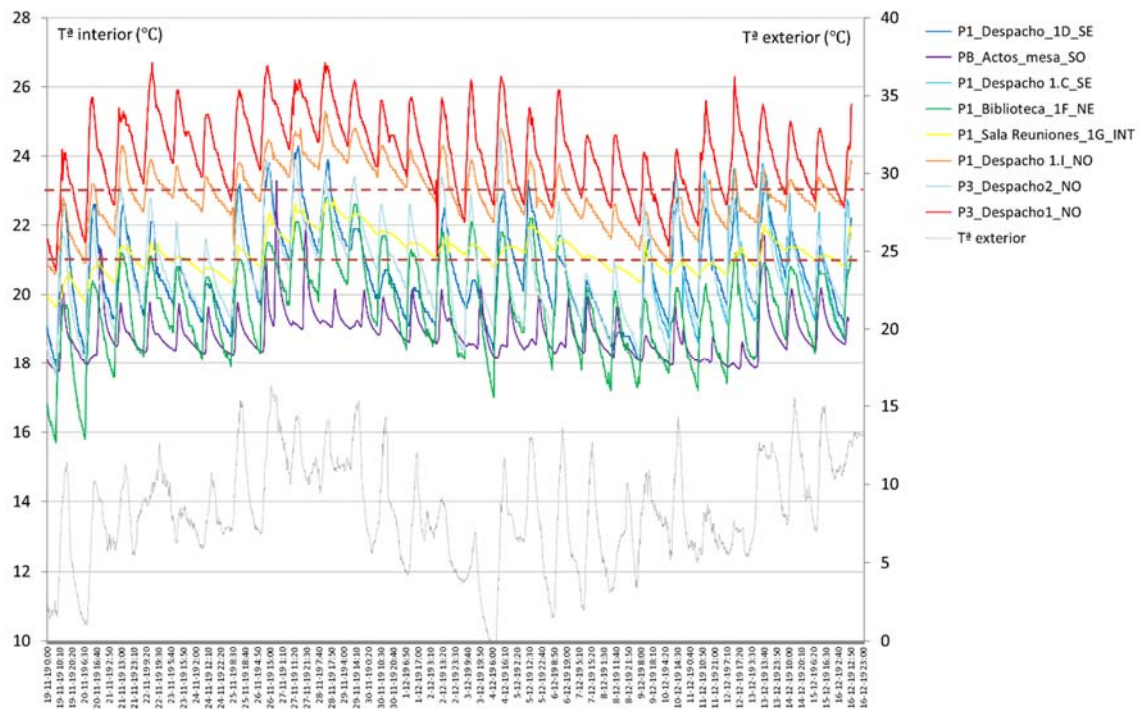


Fig.41. Gráfica general de temperaturas de invierno 2019 en las oficinas del Museo de Navarra, en relación a los rangos recomendados para oficinas en invierno (21-23°C) (periodo monitorizado: 19-11 al 16-12-2019)

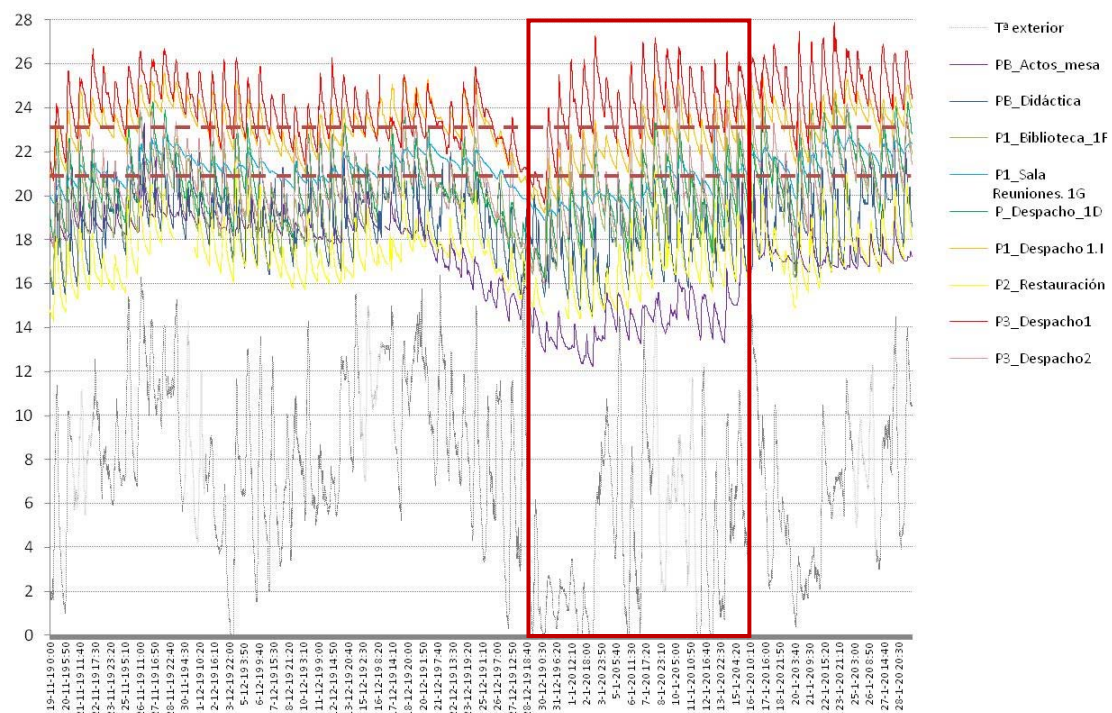


Fig.41B. Gráfica general de temperaturas de invierno 2019 en las oficinas del Museo de Navarra, en relación a los rangos recomendados para oficinas en invierno (21-23°C). Periodo (19/11/2019-31/01/2020)

En la siguiente gráfica de la Fig.42. de sólo una semana (2-8 de diciembre), se aprecian claramente los horarios de calefacción, el fin de semana, la estabilidad de la sala de reuniones interior, y que los despachos a noroeste (en P1 y especialmente en P3), que por orientación

reciben menos radiación solar, son los que tienen mayores temperaturas por la regulación de la calefacción.

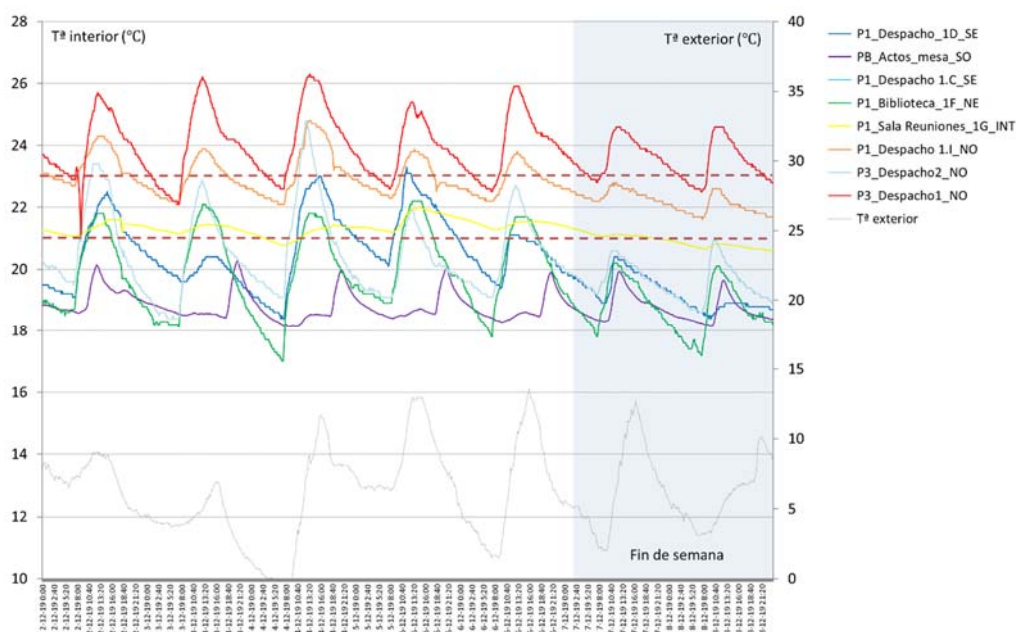


Fig.42. Gráfica parcial de temperaturas de invierno 2019 en las oficinas del Museo de Navarra, en relación a los rangos recomendados para oficinas en invierno (21-23°C). Semana: 2-9/1/2020

5.3. ENCUESTAS

Se han realizado encuestas a visitantes durante el mes de noviembre y diciembre del 2019 y a trabajadores del MN durante la segunda semana de diciembre, ambas referidas a condiciones térmicas y de ambiente interior en condiciones de invierno. Se realizaron en papel, y se recogieron el 16 de diciembre, por lo que todavía no se han podido analizar. Se van a seguir recogiendo encuestas a visitantes para tener más datos representativos en condiciones de invierno.

5.4. EVALUACIÓN DE OTROS PARÁMETROS AMBIENTALES

Aunque se han colocado cuatro trípodes en dos campañas en la monitorización de invierno, en este apartado se incluyen los datos de dos de ellas a modo de ejemplo. En concreto las de la **Campaña 1, en plantas 1ª y 4ª, y ambas en orientación oeste** (Fig.43 y Fig.44)

En relación a la estratificación, en la sala 1.2 (planta 1), se midieron temperaturas de suelo, a 0,1m, a 1,10m y a 1,70m, siendo la diferencia promedio entre 0,1m y 1,70 de 0,37°C en las medias, de 0,7°C en las mínimas y de 0,75°C en las máximas. En cambio, en la sala 4.3 (planta 4), la diferencia promedio entre 0,1m y 1,70 de 0,45°C en las medias, de 0,1°C en las mínimas y de 2°C en las máximas.

La temperatura de globo medida es de media 0,15°C menor que la ambiente en P1 (siendo las mínimas casi iguales y en las máximas 0,4°C mayor en la $T_{ambiente}$) y de 0,47°C en P4 (siendo la diferencia en las mínimas de 0,4°C y de 0,74°C en las máximas, siendo mayor siempre la $T_{ambiente}$).

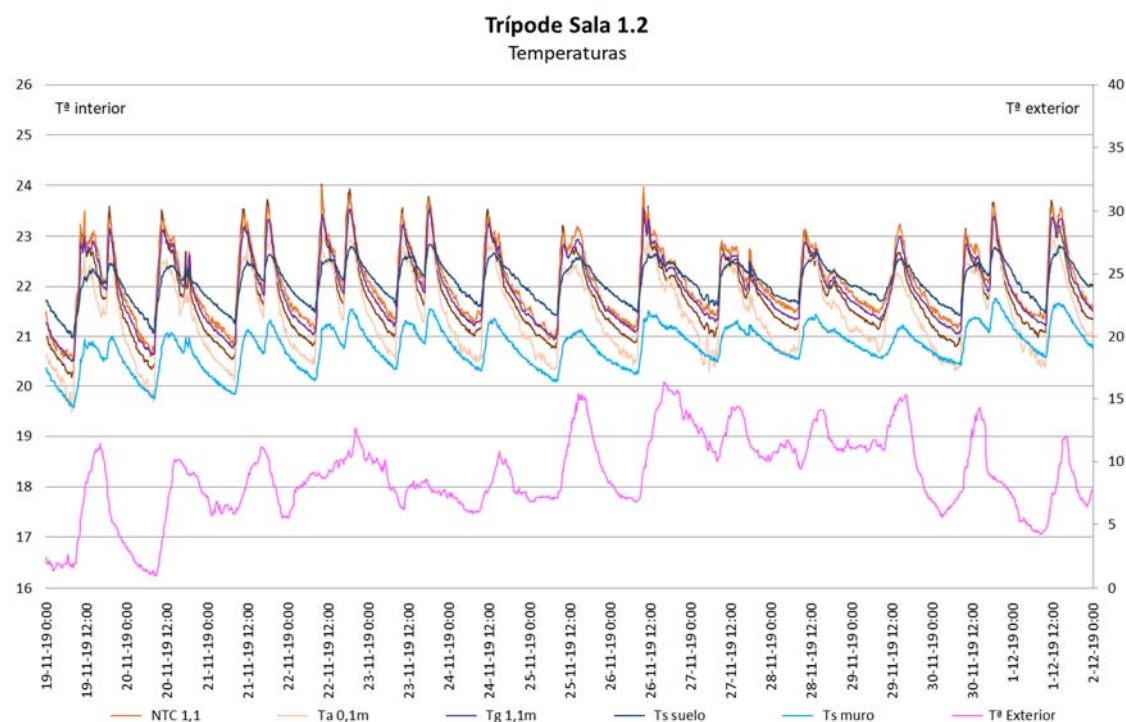


Fig.43. Sala en planta 1ª de ala expositiva orientación oeste (periodo 19-12-2019 al 2-12-2020)

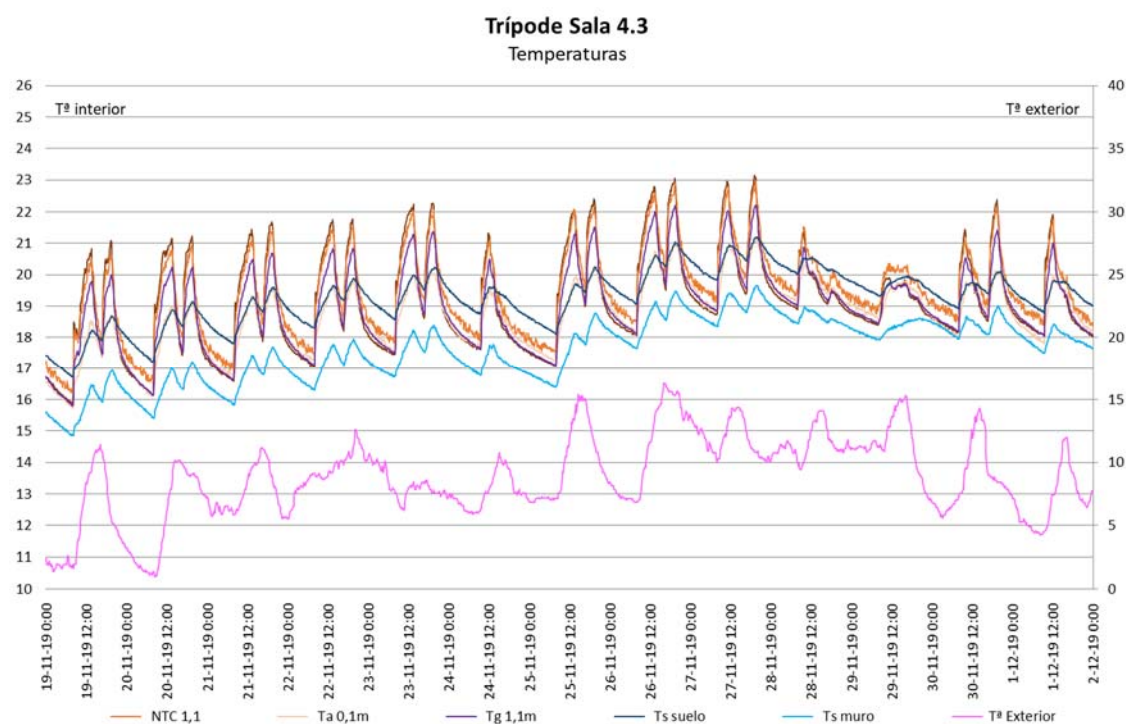


Fig.44. Sala en planta 4ª de ala expositiva orientación oeste (periodo 19-12-2019 al 2-12-2020)

5.5. ENSAYO DE TERMOGRAFÍA

Se han realizado termografías conforme a lo especificado en el apartado 3.4, tanto en condiciones reales como durante el ensayo de puerta ventilador. Se han realizado en noviembre y diciembre de 2019, cuando las condiciones exteriores han sido suficientemente frías y el edificio estaba calefactado.

Ensayos realizados en condiciones reales

En huecos interiores: se puede ver el efecto del diseño del cajado de los huecos (no es un puente térmico, sino el efecto del cajado). Se aprecia el cabzal del hueco, pero con temperaturas adecuadas, por lo que no supone ningún problema, salvo un cambio de materiales, así como las tuberías de la calefacción (ver Fig.45).



Fig.45. Termografías e imagen digital interiores de hueco de sala principal (18/11/2019)

En las salas de exposiciones del ala principal, se aprecian los puentes térmicos de las carpinterías. En la última planta se aprecian posibles subestructuras con las que se levantaron esos muros. Debido a la propia morfología de los muros, no se aprecian otros puentes térmicos. (ver Fig.46).



Fig.46. Termografías e imágenes digitales exteriores del ala expositiva del MN (2/12/2019)

Las siguientes termografías de la Fig.47. se realizaron por el exterior del taller de Didáctica. En ellas se aprecia el puente térmico de la estructura sustentante y el peto que bordea la cubierta plana. Hay que destacar que este peto aparece húmedo (en imagen digital y en termografía), lo que sugiere un problema de humedades a revisar (encuentro de impermeabilización con peto, o albardilla sobre peto). En las imágenes interiores de las mismas salas (Fig.48.), se aprecian nuevamente los puentes térmicos de la estructura, así como en el borde del forjado.



Fig.47. Termografías e imagen digital exteriores de la sala de didáctica (2/12/2019)



Fig.48. Termografías e imagen digital interiores de la sala de didáctica: fachadas (puentes térmicos y rejillas), y cubierta (2/12/2019)

A continuación, se recogen las **termografías realizadas durante el ensayo de puerta ventilador** en la sala de didáctica de planta baja y en las oficinas de planta primera. Estas termografías se han realizado, poniendo la puerta ventilador en modo crucero, manteniendo una diferencia de presión de 50Pa (el modo presión), por lo que se fuerzan las entradas de aire, y se pueden observar mejor el origen de las infiltraciones.



Fig.49. Termografías e imagen digital interiores de la sala de didáctica en planta baja: durante el ensayo de puerta ventilador (9/12/2019)

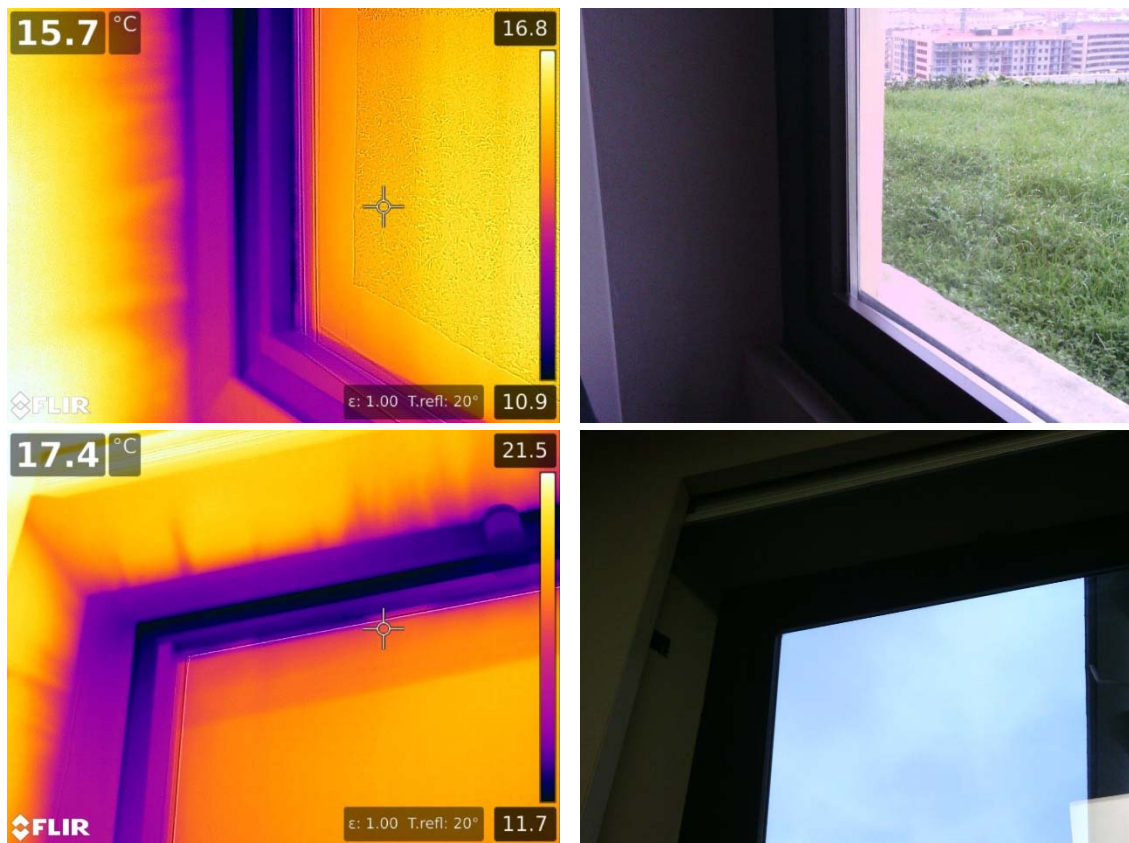


Fig.50. Termografías e imagen digital interiores de las oficinas de planta primera, durante el ensayo de puerta ventilador (12/12/2019)

Como se deduce de dichas figuras, en ambos espacios, se pueden observar **infiltraciones en los encuentros de las carpinterías con las fachadas y en las juntas entre el marco y la hoja, especialmente en las ventanas de las oficinas. En estas últimas, además, se observan infiltraciones en el encuentro de la hoja con el marco (ventana abatible).**

5.6. ENSAYOS DE PUERTA VENTILADOR

Se han realizado dos ensayos de puerta-ventilador, conforme a las normativas y especificaciones del ensayo que se han indicado en el apartado 3.4. El primero en el taller de didáctica de planta baja, con una construcción diferente del resto del museo, y uno segundo en la planta 1ª del ala de oficinas, cuya fachada opaca y huecos son muy similares a los del resto del museo. El taller de didáctica no tiene sistemas ni conductos de ventilación que comuniquen con el resto del museo, y el sistema de acondicionamiento fue apagado durante el ensayo. Las oficinas tampoco tienen conductos de ventilación conectando con el exterior ni con el resto del museo, y las rejillas de los baños fueron selladas.

Los resultados han sido los siguientes:

- Sala de Didáctica en planta baja (realizado el 9/12/2019): **$n_{50}=2,21h^{-1}$. Grado de estanqueidad medio** (valores entre $2-5h^{-1}$)
- Zona de oficinas en planta 1ª (realizado el 12/12/2019): **$n_{50}= 5,99h^{-1}$. Grado de estanqueidad bajo** (valores $> 5h^{-1}$)

Los informes de cada ensayo de puerta ventilador se adjuntan en el Anexo 4.

Según inspección visual de las carpinterías de la zona de oficinas y de la zona expositiva, las juntas de las carpinterías están en mejor estado en esta última zona que en la primera, por lo que se podría suponer a la zona expositiva un mejor grado de estanqueidad.

Cualquier tipo de reforma global o sólo de la envolvente del edificio debe tener en cuenta la mejora de este grado de estanqueidad, para poder tener demandas energéticas bajas, especialmente de calefacción. **Lo recomendable son valores dentro de un Grado de estanqueidad alto ($n_{50}<2h^{-1}$)**, teniendo siempre presente las limitaciones de los edificios patrimoniales. Se considera que un valor dentro de este rango es factible en el edificio del Museo de Navarra, con la sustitución de los huecos actuales por otros de mejores prestaciones y con los encuentros entre hueco y fachada perfectamente tratados.

5.7. ENSAYOS DE FLUJO TÉRMICO

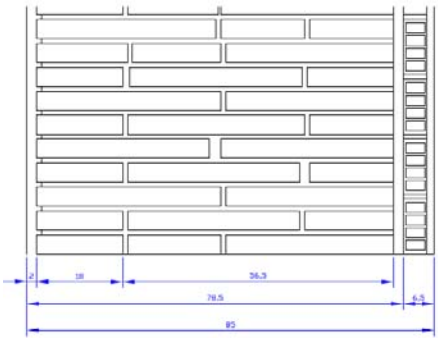
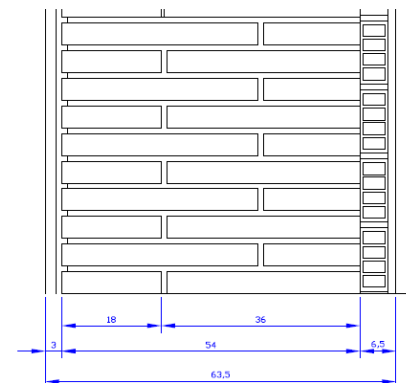
Se han realizado seis ensayos de flujo térmico, conforme a lo especificado en el apartado 3.4, que complementan los datos obtenidos en las catas, y permiten caracterizar la transmitancia térmica de los muros, puesto que se desconocen principalmente las características físicas de los ladrillos originales (especialmente conductividad, densidad y calor específico). Se adjunta en la Tabla 10, los valores de ensayo, los valores teóricos, y un esquema constructivo resultado de las catas. La justificación de los ensayos se recoge en el Anexo 5.

Los valores resultantes de las transmitancias oscilan entre 0,83 y 0,57 W/m²K, debido al espesor de los muros (entre 60cm y 102cm). Los muros de las oficinas son de las mismas características. Como resultado de las catas, se ha comprobado que no existe ninguna cámara de aire entre el ladrillo original y el trasdosado interior de regulación de los años 90 (ladrillo hueco sencillo), por lo que cualquier medida relacionada con la mejora de la transmitancia de los muros tendrá que estar cuidadosamente validada. Por un lado y acorde a la Institución Príncipe de Viena, el ladrillo original no puede aislarse por el exterior por su carácter

patrimonial, y, por otro lado, cualquier trasdosado interior tendrá que valorar el cambio de las condiciones inerciales tanto térmicas como higrotérmicas, principalmente en su contribución en reducir las oscilaciones diarias y en reducir los máximos alcanzados de temperatura y humedad relativa.

Tabla 10. Resumen de los valores de ensayo de flujo térmico (U), los valores teóricos (U), y un esquema constructivo resultado de las catas

COD 1	ESQUEMA	COD 2	U Teórica (W/m ² K)	U Real ENSAYO (W/m ² K)I
1	01 02 03 04 05 CATA 1 - Planta 1 anchura total del muro, 69 cm. MATERIALES 01. media asta ladrillo macizo 02. cámara interior macizada 03. un asta de ladrillo macizo 04. trasdosado de ladrillo hueco sencillo 05. guarnecido y enlucido de yeso e=69cm Situación: ala expositiva, planta 1ª oeste	A	0,73 (ajustado el ladrillo macizo respecto al CEC)	0,73
2	01 02 03 04 05 06 CATA 2 - Planta 1 anchura total del muro, 102 cm. MATERIALES 01. media asta ladrillo macizo 02. cámara interior macizada 03. media asta de ladrillo macizo 04. cámara interior macizada 05. hoja interior de ladrillo macizo 06. guarnecido y enlucido de yeso e=102cm Situación: ala expositiva, planta 1ª este	D	0,58 (ajustado el ladrillo macizo respecto al CEC)	Valores provisionales
3	01 03 04 05 CATA 3 - Planta 1 anchura total del muro, 79 cm. MATERIALES 01. media asta ladrillo macizo 03. asta y media de ladrillo macizo 04. trasdosado de ladrillo hueco sencillo 05. guarnecido y enlucido de yeso e=79cm	C	0,67 (ajustado el ladrillo macizo respecto al CEC)	0,65

	Situación: ala expositiva, planta 1ª norte			
4	01 02 03 04 05 06  CATA 4 - Planta 3 anchura total del muro, 82 cm. MATERIALES 01, revoco de mortero 02, hoja exterior de ladrillo macizo 03, cámara interior aislada 04, hoja interior de ladrillo macizo 05, trasdoso de ladrillo hueco sencillo 06, guarnecido y enlucido de yeso e= 85cm Situación: ala expositiva, planta 3ª este		0,57	
5	01 02 03 04 05  CATA 5 - Planta 4 anchura total del muro, 63,5 cm. MATERIALES 01, aplacado de piedra arenisca 02, mortero de aguja 03, asla y medio de ladrillo macizo 04, trasdoso de ladrillo hueco sencillo 05, guarnecido y enlucido de yeso e=63,5cm Situación: ala expositiva, planta 4ª norte	B*	0,83	Similar el B. Comprobar espesor
	e=57cm Situación: oficinas, planta 1ª (1C) sur	E		0,86
	e=60cm Situación; oficinas, planta 3ª (en zona 3B), norte	F		0,99
Nota: Dibujos realizados en base a catas realizados por el estudio de arquitectos Joaquín Torres y Verónica Quintanilla				

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

En el presente informe, se han descrito y analizado los resultados de los ensayos y de las monitorizaciones realizadas en el edificio del Museo de Navarra, durante dos campañas con condiciones diferenciadas de verano e invierno, para poder conocer el comportamiento del edificio a lo largo de todo el año. Estos datos constituyen una evaluación del comportamiento térmico y energético del edificio en uso, que puede servir como punto de partida para poder analizar con fiabilidad la efectividad de distintas medidas que se propongan en el futuro, para la mejora de la eficiencia energética del edificio.

En primer lugar, se tienen datos reales de la transmitancia térmica de las fachadas, de la estanqueidad al aire del edificio, y también se han realizado termografías que muestran el origen de las infiltraciones de aire y los puentes térmicos.

En relación a los ensayos de **flujo térmico**, los valores de las fachadas ensayadas tienen transmitancias térmicas entre 0,57-0,83W/m²K. Son valores bajos para no tener aislamiento térmico, pero se debe fundamentalmente al espesor de las fachadas (60-102cm).

En relación con el **ensayo de puerta ventilador** para evaluar la estanqueidad al aire, se ha podido hacer en dos espacios: la sala de didáctica en planta baja y las oficinas de planta primera. La sala de didáctica tiene $n_{50}=2,21h^{-1}$, lo que supone un grado de estanqueidad medio (casi de grado alto, que supone $n_{50}<2h^{-1}$), mientras que la segunda tiene $n_{50}=5,99h^{-1}$, lo que supone un grado de estanqueidad bajo. Aunque las carpinterías en esta última están en peores condiciones que las del resto del museo, sirve de base para la estimación aproximada de la estanqueidad al aire en el resto de las plantas de oficinas y expositivas, debido a que todos los huecos responden a la misma tipología. La mejora de la estanqueidad al aire es fundamental si se quiere reducir la demanda energética del edificio, por lo que se recomienda dentro del contexto de una reforma integral del edificio, con valores objetivo dentro de un grado de estanqueidad alto ($n_{50}<2h^{-1}$). Se recomienda comprobar la mejora del grado de estanqueidad a través de un ensayo de puerta ventilador, después de las obras de reforma.

En relación a las **termografías** realizadas en condiciones normales de presión y durante el ensayo de puerta ventilador, permite comprobar los puentes térmicos y el origen de las infiltraciones, centradas en general en los encuentros de las carpinterías con las fachadas y en las juntas entre el marco y la hoja. En las zonas más nuevas, también se han podido ver los puentes térmicos relacionados con las estructuras insuficientemente aisladas, así como algunos problemas en los petos de las cubiertas planas (humedades). Los puentes térmicos en edificios diseñados o rehabilitados con objetivos de poca demanda energética, deben reducirse al mínimo y trabajarse exhaustivamente en el diseño de los detalles constructivos y en la ejecución de la obra.

En segundo lugar, se han monitorizado las condiciones ambientales del edificio del MN en condiciones de verano, fundamentalmente su temperatura, humedad relativa y concentración de ppm de CO₂, y se han evaluado teniendo en cuenta los umbrales máximos para la conservación de las colecciones y del bienestar de las personas, y las limitaciones de las oscilaciones diarias. La monitorización del MN en verano ha estado muy condicionada por las tempranas olas de calor que se dieron en junio y julio, y que pusieron al edificio MN en condiciones de sobrecalentamiento a finales de junio, y que derivó en el cierre de las salas de las plantas P1-P4 de mediados de julio hasta septiembre (P1 pudo abrirse a mediados de agosto).

En relación a **las temperaturas** y en dichas **salas de exposición**, el umbral máximo de temperatura de 27°C recomendado por el Ministerio de Cultura (documento CP-0921), se ha superado prácticamente todo el verano, alcanzándose temperaturas superiores de 30°C. Se ha podido ver una diferencia promedio entre dichas salas y la planta baja y el sótano de 3,10°C en las temperaturas promedio y 2,88°C en las temperaturas máximas. Destaca la temperatura máxima medida en el MN en el taller de Restauración de 32,12°C (teniendo además en cuenta, que en esta sala sólo se registraron medidas en la primera campaña). Las temperaturas más altas se han dado durante las dos olas de calor (26-30 de junio y 22-25 de julio), y durante el periodo del 5-8 de julio, y es de destacar que la mayor temperatura promedio de muchas salas son mayores el día después de la ola de calor respecto al último día del evento. Esto se debe a la alta inercia del MN, la alta exposición a la radiación solar a través de grandes huecos a oeste y este sin sistemas de sombreamiento, y a la nula ventilación o renovación de aire nocturna, y a que no existe un sistema de climatización.

Debido a esto último, las oscilaciones diarias de temperatura están en general dentro de márgenes recomendados de 2-5°C, superándose este último rango muy puntualmente. Las mayores oscilaciones térmicas se han registrado en la planta baja en la Galería Azul y en la Sala de Temporales, y en algunas salas de planta 1ª y 3ª.

También se han realizado comparativas de temperatura con regresiones lineales de temperaturas medias diarias frente a las temperaturas exteriores (promediando los cuatro días anteriores, debido a la alta desvinculación del edificio respecto al exterior). Con ellas se ha podido constatar y evaluar, la incidencia de la orientación de las salas (las salas en orientación oeste son las más calurosas), y de las alturas (la planta más calurosa es la planta 4ª en los días más calurosos, mientras que lo es la tercera el resto de días).

La humedad relativa está dentro de los márgenes generales recomendados de 30-70%, estando las plantas 1-4 en general entre 40-50% y la planta baja y sótano alcanzan 50-60% (hasta 70%). La evaluación de las oscilaciones diarias de HR es fundamental, y debe estar entre 5-10% diario. Hay que destacar que en el taller de restauración y en la galería azul, un 45% de los días se supera el 10% de oscilación de HR, mientras que la sala de temporales los alcanza el 28% de los días.

Las condiciones ambientales interiores de los **espacios de oficinas** también se han evaluado. Las temperaturas se evalúan con respecto a la metodología adaptativa con Categoría III, por la que no se alcanzan estrictamente sobrecalentamientos, porque se dan en menos de 1% de las horas del periodo monitorizado. Las oficinas tienen más capacidad de afrontar las altas temperaturas, con posibilidad de aperturas de ventanas para ventilar, ventiladores puntuales, etc., y tienen tres orientaciones diferenciadas, siendo la orientación SE en la que se alcanzan las mayores temperaturas, a pesar de tener instalados sistemas de aire acondicionado en varios de los despachos. A pesar de registrar menores temperaturas que el área expositiva, se alcanzan temperaturas de más de 30°C, aunque los sobrecalentamientos conforme al confort adaptativo de la Categoría III, se han dado en menos del 1% de las horas (por lo que no se puede hablar de sobrecalentamiento).

También se ha medido la **concentración de ppm de CO₂**, registrándose valores inferiores a 900ppm tanto en las salas expositivas como en las oficinas. A este respecto hay que indicar que estos valores no nos dan indicaciones sobre la “Antigüedad Media Local del Aire” que es un indicador de que el aire interior pueda estar viciado. El MN no cuenta con sistema de

renovación del aire, y esta sólo se produce puntualmente a través de la apertura manual de ventanas. Los valores son similares en invierno y en verano.

En segundo lugar, se ha monitorizado las condiciones ambientales del edificio del MN en condiciones de invierno. Hay que tener en cuenta que el museo cuenta con calefacción, con circuitos independientes por plantas expositivas y otros espacios (oficinas, capilla, prehistoria), aunque con una regulación manual. Una consigna adecuada de temperatura en invierno es de 21°C (en un rango recomendado de temperaturas entre 18-23°C), siendo la mínima inferior recomendada para museos de 17°C. Las temperaturas en la zona expositiva están en general dentro de rangos aceptables de temperatura (mayores de 17°C y menores de 24°C), aunque éstas podrían reducirse en el espacio expositivo, en beneficio de la estabilidad térmica e higrotérmica del edificio, así como en la reducción de los consumos energéticos asociados. Las oscilaciones de temperatura no superan los 5°C diarios recomendados, dándose los mayores valores en las plantas sótano y baja, en concreto en la sala de prehistoria en planta sótano y en la Galería Azul en planta baja. En la galería azul y en el vestíbulo, el límite de 2°C se supera el 96% de los días, y en prehistoria y en temporales más del 60% de los días de la monitorización.

Las condiciones ambientales en las oficinas, donde se recomiendan valores de temperatura de 21-23°C, oscilan entre valores de 16°C en la biblioteca y superiores de 26°C en despachos de planta 3ª en orientación oeste, debido al sistema de calefacción. La sala de reuniones interior es la que tiene las temperaturas más estables.

La humedad relativa en el museo está en valores generales de 40-50%, aunque en algunos momentos algunas salas suben hasta el 60% y otras bajan hasta el 30%, estando todas las salas dentro de los rangos máximos recomendados para museos de 30-70%. Las oscilaciones diarias de humedad relativas se superan en un 10%, el 25% de los días en la galería Azul y el 7% de los días en Prehistoria y en la Capilla (estos dos últimos funcionan habitualmente con deshumidificadores).

En base a lo expuesto y justificado en este informe y mientras no haya un sistema de ventilación y/o climatización en el MN, **se recomienda en verano:** ventilación nocturna controlando diariamente que las temperaturas y humedades relativas están dentro de los rangos recomendados por el Ministerio de Cultura (en valores y en oscilaciones, que se puede controlar en tiempo real con los sensores higrotérmicos del MN de Sononet; y durante las olas de calor o cuando la temperatura exceda de 30°C, se recomienda informar en la entrada del museo a los visitantes, o reconsiderar los horarios de apertura en verano (especialmente si se producen nuevos eventos de olas de calor, y después de los mismos). También se recomienda la consideración del cambio de uso o reubicación de espacios, especialmente en el taller de restauración o la sala de temporales. **En invierno,** se recomienda reducir consignas de calefacción de temperaturas, especialmente en el espacio expositivo.

Para mejorar las condiciones ambientales interiores del Museo de Navarra y conseguir un edificio eficiente con muy baja demanda y consumo energético, se debiera plantear un **proyecto integral de rehabilitación.** Se considera necesario que previamente se realicen modelos de simulación energética donde analizar y evaluar medidas de mejora de la eficiencia energética del edificio. Esta simulación energética debería tener en cuenta los siguientes aspectos y medidas:

- Envolvente opaca. Las secciones constructivas aportadas por la propiedad de los diferentes muros del MN, son consistentes con los valores resultantes de los ensayos de flujo térmico. La mejora de la resistencia térmica de la envolvente, debe tener en

cuenta las características de inercia térmica e higrotérmica de los muros actuales, que contribuyen a la necesaria estabilidad higrotérmica para la conservación de las colecciones. A este respecto, hay que tener en cuenta que, cuando se acometa una rehabilitación de la envolvente térmica (ya sea por el exterior, que constructiva y energéticamente sería la mejor medida, o por el interior, y teniendo en cuenta que no hay cámara interior que posibilite su relleno de aislamiento), deben estudiarse desde el punto de vista de su contribución no sólo respecto a las pérdidas y ganancias térmicas, sino a la mejora que la inercia térmica proporciona en controlar las oscilaciones térmica e higrotérmicas diarias y estacionales.

- Huecos de la envolvente. Carpinterías de aluminio sin RPT y con vidrios dobles con cámara de aire. Los huecos pueden modificarse o sustituirse en su totalidad (carpinterías y vidrios) en una hipotética rehabilitación integral (ya que son diseño de la rehabilitación de los años 90), por lo que un estudio exhaustivo por orientaciones de la selección del vidrio y de la carpintería es necesario para asegurar su óptimo funcionamiento a lo largo de todo el año. La sustitución de los huecos, dará lugar a la mejora del nivel de estanqueidad al aire y la reducción de los puentes térmicos (vista fundamentalmente en los ensayos realizados, en los encuentros con los huecos).
- Los huecos no tienen sistema de sombreado lo que sin duda contribuye al sobrecalentamiento interior en condiciones de verano. Podría incorporarse un sombreado a dichos huecos, puesto que estos sistemas están dentro del contexto urbano. Estos son especialmente importantes, por la orientación principal de los huecos del ala principal (oeste-este), por lo que su diseño y desempeño efectivo en condiciones de verano para reducir la carga térmica, debe estudiarse cuidadosamente. Las características de factor solar del vidrio, también contribuye a reducir la carga térmica, pero debe estudiarse cuidadosamente la transparencia y el color de dicho vidrio.
- Cubiertas. Hay dos tipos principales de cubierta, plana de grava e inclinada de teja. Ésta última se puede rehabilitar sin problemas manteniendo la teja como cobertura, para poder realizar una cubierta aislada y ventilada que mejora el comportamiento actual.
- El control de las infiltraciones debe garantizarse desde el diseño de los detalles constructivos, hasta su ejecución en obra.
- Ventilación. El asegurar la renovación del aire es fundamental para el bienestar y la salud de las personas, y también puede afectar a la estabilidad de las colecciones si hay introducción de aire con calidad inadecuada. Hoy en día, la única alternativa para un uso de museo es a través de medios mecánicos, que suponen la instalación de un nuevo sistema del que ahora no se dispone (puesto que sólo se produce mediante ventilación natural por apertura manual de ventanas), y que supondrá un consumo energético nuevo. Debe valorarse mediante simulaciones previas, la adecuación de los sistemas y la instalación de sistemas de recuperación de calor que den lugar a un bajo consumo energético, asegurándose altos estándares de calidad del aire.
- El diseño del edificio, debe optimizar con todas las medidas pasivas de la envolvente descritas anteriormente y otras que se puedan proponer, la menor demanda conjunta de energía de calefacción, refrigeración y renovación del aire
- El sistema de calefacción debe poderse regular y controlar, de modo que se alcancen menores temperaturas, adecuadas a la estación y no se lleguen a bajos e innecesarios niveles de HR. La caldera de gasoil debiera ser sustituida por otro sistema de producción de energía renovable o de bajas emisiones.

- No hay sistema de refrigeración en el edificio del Museo de Navarra, y éste es fundamental para asegurar las condiciones higrotérmicas que demandan las altas exigencias ambientales para la conservación de las colecciones, y que no se pueden conseguir de manera manual. Este deberá dimensionarse y estudiarse acorde con una reforma integral del edificio que aborde la eficiencia energética del edificio procurando la menor demanda posible de energía mediante medidas pasivas, de modo que el sistema pueda utilizarse cuando las condiciones exteriores lo hagan imprescindible. Un sistema central que incluya también la zona de oficinas hará posible que, en las fachadas del museo, así como en el patio trasero, no aparezcan unidades exteriores de aire acondicionado, estando éstos colocados en cubierta en espacios acondicionados y tratados con ese fin (desde el punto de vista funcional, estético, etc.).
- El estudio de energías renovables adecuadas al edificio y a su situación en el entorno urbano también es necesario.

Pamplona, 29 de septiembre de 2020.

SAVIArquitectura. Universidad de Navarra

REFERENCIAS

- [1] Instituto de Patrimonio Cultural Español. Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales. Ministerio de Cultura, Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos, (2009) 1–6.
- [2] UNE-EN 15251, Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido, (2008).
- [3] MIET, Reglamento de las Instalaciones Térmicas En Los Edificios (RITE). Versión consolidada 2013, (2013).
- [4] R.P. Kramer, M.P.E. Maas, M.H.J. Martens, A.W.. van Schijndel, H.L. Schellen, Energy conservation in museums using different setpoint strategies: A case study for a state-of-the-art museum using building simulations, Appl. Energy. 158 (2015) 446–458.
- [5] Torroja IETCC, Catálogo de elementos constructivos, (2010).
http://www.codigotecnico.org/web/recursos/aplicaciones/contenido/texto_0012.html.
- [6] AEMET, Olas de calor en España desde 1975. Área de Climatología y Aplicaciones Operativas, 2019.
- [7] UNE-EN 13829, Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified), (2002).
- [8] CTE-HE, Documento Básico CTE-HE Ahorro de energía, Septiembre. (2013).
<http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf> (accessed March 16, 2017).
- [9] UNE-EN 12831:2003, Heating systems in buildings. Method for calculation of the design heat load, (2003).

- [10] ISO 9869-1 Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance- Part 1: Heat flow meter method, (2014).