



Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE.
Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias
filmógenas

Autor: Macarena Belén Collazo Inglesini

Treball Final de Grau

Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals

Tutor: Esther Martínez Gil

Curs: 2023-2024

Resumen

En los procesos de limpieza de obras policromadas se utilizan habitualmente mezclas de disolventes provenientes de fuentes no renovables, que suelen ser contaminantes o tóxicas para el ser humano y perjudiciales para el medio ambiente.

En la búsqueda de una alternativa más ecológica y sostenible se realiza una reseña bibliográfica de los disolventes verdes que actualmente están en el mercado y son usados en restauración. Se realiza una recopilación de sus principales usos y características obteniendo como resultado una tabla comparativa. A partir de esta tabla y de casos de estudio se eligen tres disolventes (D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE) como alternativa a la tríada de disolventes del Test de Cremonesi (Isooctano, Acetona y Etanol).

La efectiva remoción de sustancias filmógenas de ambas tríadas se comprueba mediante observaciones visibles y mediante fluorescencia inducida por rayos UV, utilizando un microscopio digital de superficie, en muestras preparadas con barniz dammar, goma laca, Paraloid®, Varnish Regal Gloss y Acril 33. También se realizan pruebas sobre una obra original que presentaba un barniz oxidado de resina colofonia.

El resultado permitió observar que la tríada verde puede utilizarse como una buena alternativa a los disolventes del Test de Cremonesi, y que el disolvente DBE presenta las mejores características por ser menos agresivo para la obra, más sostenible para el medio ambiente y menos tóxico para el restaurador.

Palabras clave

Limpieza / Sustancias filmógenas / Disolventes verdes / Tríada de disolventes / Comparativa

Abstract

In the cleaning processes of polychrome works, mixtures of solvents from non-renewable sources are usually used, which are usually pollutants or toxic to humans and harmful to the environment.

In the search for a more ecological and sustainable alternative, a bibliographic review of the green solvents currently on the market and used in restoration is made. A compilation of their main uses and characteristics is made, resulting in a comparative table. Based on this table and case studies, three solvents (D-Limonene, Propylene Carbonate and DBE) are chosen as an alternative to the triad of solvents of the Cremonesi Test (Isooctane, Acetone and Ethanol).

The effective removal of filmogenic substances of both triads is verified by visible observations and by UV-induced fluorescence, using a digital surface microscope, on samples prepared with dammar varnish, shellac, Paraloid®, Varnish Regal Gloss and Acril 33. Tests are also carried out on an original work that presented an oxidized rosin resin varnish.

The results showed that the green triad can be used as a good alternative to the solvents of the Cremonesi test, and that the DBE solvent has the best characteristics as it is less aggressive for the work, more sustainable for the environment and less toxic for the restorer.

Keywords

Cleaning / Film-forming substances / Green solvents / Solvent triad / Comparison

Índice

1. Introducció.....	7
2. Objectius	9
3. Metodologia	10
4. Evolució de la neteja química en Conservació-Restauració.....	11
5. Concepte de química verda y principis	16
6. Paràmetres, característiques y normativa para la determinació del caràcter “verda” de un disolvent	18
7. Disolvents verds y comparativa	23
8. Casos de estudi.....	26
9. Fase experimental.....	32
9.1. Elecció de disolvents verds	32
9.2. Elecció de substàncies filmògenes para la preparació de les probetes	37
9.3. Preparació de les probetes.....	38
9.4. Obra original para estudi	40
9.5. Mètode de aplicació de els disolvents	42
9.6. Descripció de els anàlisis realitzats	43
9.7. Càlcul de els paràmetres de solubilitat de els disolvents verds y sus mezclas .	43
9.8. Determinació de els paràmetres de solubilitat y proves de neteja.....	44
10.8.1. Probetes con substàncies filmògenes	44
10.8.2. Obra original.....	45
9.9. Resultats	47
10.9.1. Probetes con substàncies filmògenes	47
10.9.2. Obra original.....	52
9.10. Discussió de resultats.....	54
10. Conclusióes generals	58
11. Bibliografia.....	60
12. Annexos.....	68
12.1. Anexo I. Classificació disolvents CHEM 21	68

12.2. Anexo II. Información técnica y principales características de los disolventes verdes seleccionados	70
12.2.1. Carbonato de propileno	70
12.2.2. DBE	71
12.2.3. Dimetil Carbonato	72
12.2.4. Dioxolano.....	73
12.2.5. D-Limoneno	74
12.2.6. Ethylal	75
12.2.7. Etil L-Lactato	76
12.2.8. Green Rescue.....	77
12.2.9. Pelargonato de 2-etilhexilo	78
12.2.10. Solketal.....	79
12.2.11. TOU.....	80
12.2.12. Y-Valerolactona	81
12.3. Anexo III. Estudio toxicidad disolvente TOU	82
12.4. Anexo IV. Información técnica y características de las sustancias filmógenas	83
12.5. Anexo V. Cálculo de mezclas de los disolventes verdes seleccionados	86
12.6. Anexo VI. Área de solubilidad goma laca y resina dammar	87
12.7. Anexo VII. Links fichas técnicas y de seguridad de los disolventes verdes	88

1. Introducció

El proceso de limpieza de obras de arte constituye uno de los procedimientos más complicados e irreversibles dentro del tratamiento de un bien cultural. Incluye la eliminación o retirada de suciedad, polvos, manchas, sustancias filmógenas como barnices que se encuentran degradados o alterados químicamente (oscurecidos o amarillentos), la eliminación de retoques o repintes. Aunque estos procedimientos se llevan realizando desde la antigüedad, los enfoques modernos, científicos y sistemáticos comenzaron a aparecer en las últimas décadas del siglo pasado (Çakmak et al., 2022).

El enfoque actual contempla la eliminación selectiva y controlada de los materiales no deseados por razones de conservación curativa o por razones estéticas para lograr la correcta legibilidad de la obra con el objetivo de expresar el mensaje para el que fue creado.

Con el objetivo de lograr sistemas de limpiezas más selectivos y controlables, en los últimos años se le ha dado especial importancia a la búsqueda e investigación de nuevos materiales y métodos menos agresivos para la obra, más sostenibles para el medio ambiente y menos tóxicos para el restaurador.

En esta línea, las limpiezas químicas han sufrido grandes cambios con el desarrollo de las limpiezas acuosas de superficies policromadas, desarrollada inicialmente por R. Wolbers durante las últimas décadas del siglo pasado, y que han ido evolucionando con aportaciones de otros investigadores, como Paolo Cremonesi, entre otros. Así, junto al desarrollo de las limpiezas acuosas, se introduce el uso de quelantes y/o tensoactivos para mejorar la acción de las soluciones tamponadas, se mejora el uso de los disolventes orgánicos, se introduce el uso de soluciones miscelares y de macro y microemulsiones y la utilización de enzimas y bacterias para la eliminación de pátinas inorgánicas y revestimientos orgánicos. También se han introducido mejoras en la aplicación de las soluciones acuosas y disolventes orgánicos con la utilización de gelificantes que permiten sortear varios de los problemas tradicionales propios de la limpieza de bienes culturales: el hinchamiento de las capas pictóricas subyacentes, la lixiviación de la policromía o mezclas no deseadas de la capa de protección y la capa pictórica (Samorì et al., 2016).

Sin embargo, muchos de los métodos mencionados pueden tener aplicaciones limitadas o puntuales ya que por ejemplo las emulsiones son poco efectivas para los barnices envejecidos, el uso de enzimas es caro y requiere de ciertas condiciones específicas, los microorganismos y/o bacterias requieren del monitoreo de las superficies tratadas antes y después para evitar la contaminación/proliferación y existe la necesidad de adaptar la acción de limpieza caso por caso, los disolventes aplicados mediante geles requieren pasos adicionales para eliminar los residuos del gel (Casini et al., 2023). Estos constituyen algunas de las razones por las cuales estos métodos no tienen una amplia aplicación diaria en las prácticas de restauración y se utilizan esporádicamente o para situaciones puntuales.

A pesar de los avances mencionados y de sus limitaciones, para la eliminación de capas protectoras envejecidas y dañadas como los barnices o resinas se continúan utilizando disolventes orgánicos que presentan generalmente un perfil de riesgo debido a su volatilidad y toxicidad y pueden ocasionar daños al conservador y al medio ambiente (Melchiorre et al., 2023).

En consecuencia, con el presente trabajo se pretende investigar que disolventes que sean menos tóxicos y encuadrados dentro del concepto de “Química verde” se pueden utilizar para las limpiezas de obras policromadas.

La razón o el interés de la temática planteada tiene su origen en la necesidad de difundir y promover el uso de prácticas y materiales más saludables para el conservador, y de menor impacto para el medio ambiente y para las obras.

2. Objectivos

A partir de la temática planteada se describen a continuación los objetivos específicos del trabajo:

- Determinar cuáles son los disolventes verdes más comúnmente utilizados en la actualidad para la realización de limpiezas de obras policromadas.
- Investigar los usos, características, ventajas y desventajas de los productos mencionados.
- Seleccionar disolventes verdes que puedan ofrecer una alternativa a la tríada de disolventes más utilizados en el Test de Cremonesi (isooctano, etanol y acetona).
- Determinar mediante pruebas de limpieza la efectividad de los disolventes verdes en la eliminación de sustancias filmógenas en comparación con los disolventes de la tríada de Cremonesi.

3. Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos, se plantean dos etapas diferenciadas: una teórica, que contempla la investigación y análisis de la información recolectada, y una experimental, sujeta a los resultados obtenidos en la investigación. En la etapa teórica se aborda la evolución de las limpiezas químicas, comenzando con su origen hasta llegar a la situación actual. También se introduce el concepto de “Química verde” y sus principios, y se realiza una revisión de los disolventes utilizados en restauración, evaluando su impacto medioambiental y el cumplimiento de los principios verdes.

A partir de estudios científicos, revistas especializadas y libros, se selecciona una lista de disolventes verdes en investigación o aplicados en obras reales. De cada uno se analizan características clave como el punto de ebullición, la toxicidad, la presión de vapor, el olor, la presencia de VOC, entre otras. A continuación, se comparan estos disolventes, teniendo en cuenta otros factores como la solubilidad, el proveedor que lo comercializa y el precio. Se incluyen los estudios más relevantes que apoyan la selección de disolventes para la fase experimental.

La segunda fase es experimental y se basa en los resultados obtenidos en la investigación teórica. Se seleccionan tres disolventes verdes, evaluando sus pros y contras según factores como accesibilidad, costo, baja toxicidad, biodegradabilidad y su origen renovable. Tras la selección, se planifican las pruebas para evaluar la efectividad de estos disolventes en la remoción de sustancias filmógenas, comparándolos con la tríada de Cremonesi (isooctano, etanol y acetona), con el objetivo de plantear una alternativa menos agresiva para la obra y menos tóxica para el restaurador y el medio ambiente.

Se confeccionan probetas sobre portaobjetos de vidrio con diferentes sustancias filmógenas, que se dejan secar durante dos semanas. Además, se realizan pruebas sobre una obra original con barniz degradado. La efectividad de la limpieza se determina mediante fotografías tomadas antes y después del proceso, utilizando el microscopio digital Premier® con luz difusa y luz ultravioleta. Se realizan pruebas de limpieza usando el test de Cremonesi para determinar los parámetros de solubilidad e igualarlos con los disolventes verdes. Posteriormente, se lleva a cabo el proceso de limpieza utilizando ambos tipos de disolventes.

Finalmente, los resultados obtenidos en la fase experimental se valoran para analizar la efectividad de la alternativa verde propuesta, sus limitaciones y fortalezas y se invita a continuar investigando este campo poco tratado a la comunidad de conservadores-restauradores.

4. Evolución de la limpieza química en Conservación-Restauración

En el Diccionario temático jerarquizado de arte y arquitectura (Tesauro de Arte y Arquitectura, s. f.) se define la limpieza como: “Eliminar de un sustrato la suciedad, revestimientos superficiales, depósitos, decoloraciones y otras sustancias”. Según el glosario EwaGlos (ICOMOS, 2015), es el “proceso de eliminación de depósitos de suciedad, materiales ajenos y productos de alteración que pueden ser causa o fuente de deterioro”. Dado que se trata de un procedimiento irreversible (Zalbidea, 2008) es fundamental elegir métodos y materiales que eliminen depósitos sin dañar la obra ni perjudicar al restaurador.

Tesauros (Tesauros, s. f.) define el disolvente como una “sustancia generalmente líquida y volátil, capaz de disolver, sin cambios químicos, una sustancia sólida o semi-sólida, formando una disolución homogénea”.

Estas definiciones contextualizan el concepto de limpieza con disolventes. Sin embargo, la documentación sobre sus procesos históricos es limitada. En *Imágenes y sedimentos: la limpieza en la conservación del patrimonio pictórico* (Barros García, 2005), se traza una evolución que va desde Plinio hasta los referentes actuales como Wolbers y Cremonesi.

Plinio el Viejo menciona la limpieza en *Naturalis Historia* (Pliny, 1967). En el Renacimiento aparecen descripciones técnicas, mientras que en el s. XVIII los tratados incluyen numerosas recetas. El verdadero avance llega en el s. XIX con manuales prácticos de restauración. En el siglo XX, especialmente desde los años 50, surgen metodologías científicas para abordar el problema.

En cuanto a los disolventes orgánicos, su uso fue limitado hasta el s. XVIII, cuando se empleó alcohol etílico, frecuentemente mezclado con esencia de trementina. La receta *mista* se popularizó, pero la falta de conocimiento produjo intervenciones agresivas como el *Método Guizzardi*, que consistía en aplicar alcohol sobre la superficie de la pintura, prenderlo fuego y luego apagarlo con un paño húmedo. Otras prácticas nocivas incluían el uso de sosa, potasa y cal viva (*olio di tartaro*). A finales del s. XIX y principios del XX, la comercialización de disolventes orgánicos permitió abandonar paulatinamente estos métodos. En 1936, Renato Mancini elaboró una lista de disolventes para limpieza incluyendo la trementina, el cloroformo, el tetracloruro de carbono, la acetona, el xileno, el benceno y el éter sulfúrico.

En las últimas décadas del s. XX, la limpieza fue abordada en obras fundamentales como *Teoría del Restauro* de Cesare Brandi (1963) y la *Carta del Restauro* de 1972. Pero la publicación que sentó las bases de la teoría de la eliminación de sustancias filmógenas actuales fue la realizada por el IRPA¹ en 1994: *Les Solvants* (Masschelein-Kleiner, 1994). Este libro fue producto de la investigación desarrollada por varios científicos de este instituto en la década del 80' con el objetivo de entender el comportamiento de los disolventes en contacto con las capas pictóricas y barnices.

Se estructura en tres capítulos: 1) mecanismos fisicoquímicos, 2) descripción de disolventes en conservación, y 3) aplicaciones. También incluye una tabla de disolventes según tipos de

¹ The Royal Institute for Cultural Heritage, fundado en 1948 con sede en Bruselas, Bélgica.

limpieza y curvas de retención (Masschelein-Kleiner, 1994). No obstante, esta tabla se encuentra obsoleta actualmente ya que propone disolventes que son tóxicos y no incorpora disolventes de uso habitual como la acetona. Sin embargo, no se considera obsoleta la clasificación en categorías, ni tampoco el cálculo de los parámetros de cada uno de los disolventes, como así tampoco los datos de evaporación.

Desde los años 80 del siglo XX, Richards Wolbers revolucionó los sistemas de limpieza con propuestas a medida, capaces de actuar sobre materiales específicos sin afectar otros. Sus métodos incluyen jabones de resina, geles de disolventes, emulsiones y geles enzimáticos. Este enfoque a medida representó un cambio fundamental, especialmente en lo relacionado con los desafíos de preservar capas pictóricas complejas.

Retomando el foco en los sistemas de limpieza químicos, un líquido disuelve un sólido cuando sus moléculas rompen los enlaces intermoleculares del sólido, siguiendo la regla de “semejante disuelve semejante”. En 1950, Hildebrand proponía la existencia de un único parámetro (δ)² de solubilidad como una forma de comparación de la capacidad de un disolvente para disolver un soluto. Sin embargo, esta teoría que establecía que cuantos más parecidos fueran los parámetros de solubilidad de dos sustancias, más miscibles serían entre sí; terminó siendo incompleta. Estudios posteriores (1966-1968) demostraron que la solubilidad depende de tres fuerzas intermoleculares:

- Van der Waals (de London) o fuerzas de dispersión (F_d)
- Dipolo-dipolo (dipolo permanente) o fuerzas polares (F_p)
- Enlace de hidrógeno o fuerzas de puentes de hidrógeno (F_h)

Hansen (1966) y otros, realizaron cálculos para determinar parámetros numéricos relacionados a la contribución de las fuerzas intermoleculares en los disolventes.

Pero fue Teas, en 1968, quién realizó el cálculo de porcentajes a partir de estudios anteriores para ubicar los parámetros de solubilidad en un triángulo con representación gráfica bidimensional (Zalbidea, 2008):

- Las fuerzas de dispersión (f_d) se encuentran representadas en la base del triángulo.
- Las fuerzas polares (f_p) se representan en el lado derecho del triángulo.
- Y finalmente los enlaces de hidrógeno (f_h) se encuentran en el lado izquierdo.

Adicionalmente Teas realizó más estudios para poder determinar los parámetros o zonas de solubilidad de las sustancias filmógenas, ubicándolos en el triángulo y estableciendo zonas bien definidas:

² Donde δ = calor latente de vaporización.

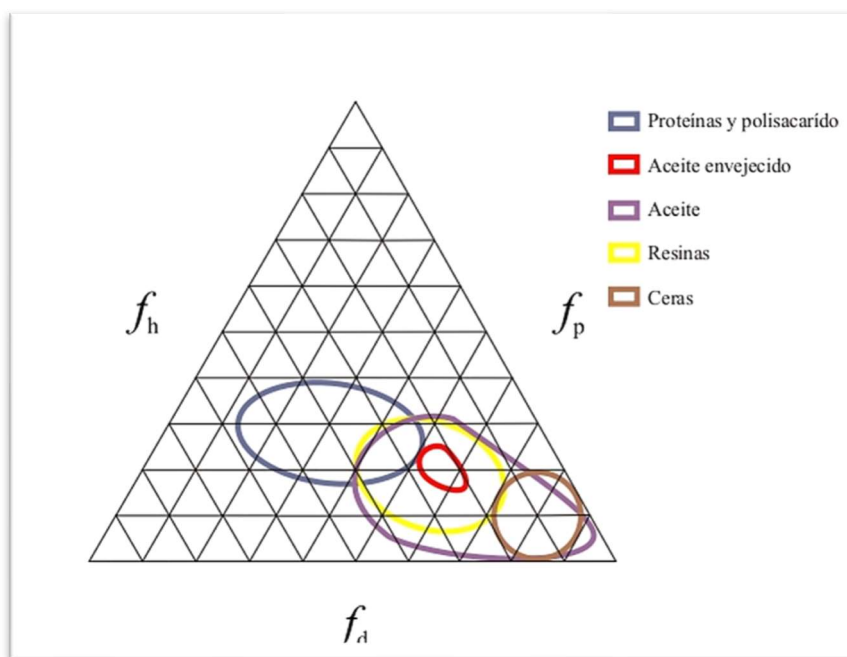


Imagen 1. Solubilidad de diferentes sustancias filmógenas (Saera, 2008)

Posteriormente, en el año 1972 Feller propuso un test de solubilidad para barnices, en el cual incluía el uso de tres disolventes y una serie de 11 mezclas: ciclohexano, tolueno y acetona, preparadas en un orden creciente de polaridad. Luego, Richard Wolbers propuso otro test abarcando una mayor área de solubilidad utilizando: Mineral Spirits, isopropanol y acetona. Este test incluía la utilización de disolventes puros o de dos mezclas (Saera, 2008).

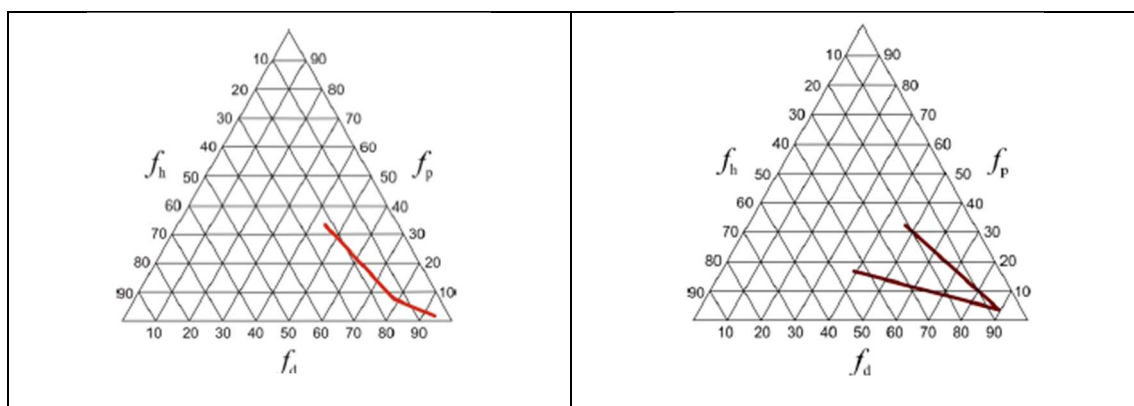


Imagen 2. Izquierda: test de solubilidad de Feller. Derecha: test de solubilidad de Wolbers (Saera, 2008)

Finalmente, Cremonesi creó otro test basado en el de Feller, en donde reemplazó el tolueno altamente tóxico por la ligroína, un hidrocarburo derivado del petróleo de baja toxicidad y con poco contenido de hidrocarburos aromáticos. Posteriormente, sustituyó este disolvente por el isooctano ya que en el s. XXI se conoció mejor el efecto tóxico que podía tener la ligroína en caso de contener un porcentaje de benceno superior al 0,1% y fue clasificado como CMR cat.1 (cancerígeno y/o mutágeno). Además, incorporó el etanol, logrando ampliar el test hacia una

Macarena Collazo Inglesini – Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE. Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias filmógenas

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, curs 2023-2024

zona de mayor polaridad. Como en los casos anteriores, propuso el uso de los disolventes puros o mediante una mezcla de dos. Las diferentes combinaciones y parámetros se exponen en la siguiente tabla:

Código Mezcla	% Volumen			Parámetros de solubilidad		
	Isooctano	Acetona	Etanol	Fd	Fp	Fh
I	100			100		
IA1	90	10		95	3	2
IA2	80	20		89	7	4
IA3	70	30		84	10	6
IA4	60	40		79	13	8
IA5	50	50		74	16	10
IA6	40	60		68	19	13
IA7	30	70		63	22	15
IA8	20	80		58	25	17
IA9	10	90		52	29	19
A		100		47	32	21
IE4	60		40	74	7	19
IE5	50		50	68	9	23
IE6	40		60	62	11	27
IE7	30		70	55	13	32
IE8	20		80	49	14	37
IE9	10		90	42	16	42
E			100	36	18	46
AE		50	50	42	25	33

Tabla 1. Test de Cremonesi (Nualart & Martínez, 2023)

Por último, Cremonesi preparó una tabla incluyendo disolventes de uso común que requieren de unas mínimas precauciones y disolventes de uso ocasional. Los disolventes que no aparecen en estos listados se consideran muy tóxicos y no se recomienda su uso.

Disolventes de uso común (= mínimas precauciones)			
Disolvente	Fd	Fp	Fh
Isooctano	100	0	0
Ligroína (benceno<0,1%)	97	2	1
Ciclohexano	94	2	4
Butilacetato	60	13	27
Metiletilcetona	53	30	17
Etilacetato	51	18	31
Acetona	47	32	21
Etil Lactato	44	21	35
Isopropanol	38	17	45
Etanol	36	18	46

Disolventes de uso ocasional			
Disolvente	Fd	Fp	Fh
Esencia de petróleo	90	4	6
Xileno	83	5	12
Tolueno	80	7	13
Limoneno	75	20	5
Isobutylmetilcetona	58	22	20
Alcohol Bencílico	48	16	36
Diaceton alcohol	45	24	31

Tabla 2. Disolventes de uso común y uso ocasional (Nualart & Martínez, 2023)

La determinación de la solubilidad no basta para garantizar un trabajo de limpieza adecuado; es necesario analizar otros factores clave sobre el comportamiento de los disolventes, como los descritos en *Les Solvants* (Masschelein-Kleiner, 1994):

- La penetración o difusión de un líquido: depende de la porosidad de la capa pictórica y de las características del disolvente, como la viscosidad y la tensión superficial. Una mayor viscosidad del disolvente reduce la penetración, mientras que una tensión superficial alta del mismo favorece la penetración por capilaridad.
- La evaporación/retención: depende de varios factores: la presión de vapor, el punto de ebullición y el calor latente de vaporización. Un disolvente de evaporación muy rápida no permite reblandecer adecuadamente y necesita de una acción mecánica, grandes cantidades de disolvente o el uso de gelificados. Los de evaporación lenta permanecen mucho tiempo en la estructura pictórica provocando problemas como la disolución de materiales originales, hinchazón de la superficie o lixiviación.
La retención se define como la resistencia de las capas internas del cuerpo impregnado del líquido a dejarlo escapar.
- La disolución: es el fenómeno en donde las moléculas del solvente se introducen entre las moléculas del sólido y las separan.

5. Química verde y principios

La asociación de la palabra verde con el medio ambiente comenzó a principios de la década de 1970. Uno de los primeros antecedentes fue la publicación del libro *Primavera Silenciosa* de Rachel Carson en 1962 (Carson, 1962) donde hablaba de los efectos perjudiciales de los pesticidas en el medio ambiente y culpaba de la creciente contaminación a la industria química.

Sin embargo, el concepto de Química Verde no fue introducido hasta el año 1998 por Paul Anastas y John Warner en su libro *Green Chemistry: Theory and Practice* (Anastas & Warner, 1998) donde la definieron como “la utilización de un conjunto de principios que reducen o eliminan el uso o la generación de sustancias peligrosas en el diseño, la fabricación y la aplicación de productos químicos”. Adicionalmente, establecieron 12 principios que rigen este concepto y que se detallan a continuación:

- 1 Prevención de la contaminación
- 2 Economía de átomos
- 3 Síntesis químicas menos peligrosas
- 4 Diseño de productos químicos más seguros
- 5 Disolventes y productos auxiliares más seguros
- 6 Diseño para la eficiencia energética
- 7 Utilización de materias primas renovables
- 8 Reducción de derivados
- 9 Catálisis
- 10 Diseño de sustancias no persistentes
- 11 Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación
- 12 Química intrínsecamente segura

Macarena Collazo Inglesini – Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE. Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias filmógenas

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2023-2024

Estos principios se definen de la siguiente manera:

- 1- Prevención de la contaminación: siempre será mejor evitar la formación de desechos o residuos que tratarlos a posteriori.
- 2- Economía de átomos: se debe maximizar la incorporación de todos los materiales usados en el producto final.
- 3- Síntesis químicas menos peligrosas: los métodos usados deben generar sustancias con poca o ninguna toxicidad para el medio ambiente y para el ser humano.
- 4- Diseño de productos químicos más seguros: productos que mantengan su eficacia pero que presenten una toxicidad nula o reducida.
- 5- Disolventes y productos auxiliares más seguros: se debe evitar el uso de disolventes, pero en caso de ser necesarios estos deben ser inocuos.
- 6- Diseño para la eficiencia energética: el uso de la energía en los procesos debe minimizarse de tal manera que los métodos sintéticos se lleven a temperatura ambiente.
- 7- Utilización de materias primas renovables: se debe priorizar su uso antes que la de los recursos agotables.
- 8- Reducción de derivados: se debe evitar o reducir la derivación de compuestos.
- 9- Catálisis: se prefieren los reactivos católicos a los estequiométricos.
- 10- Diseño de sustancias no persistentes: productos que una vez utilizados no persistan en el medio ambiente y se degraden a productos inocuos.
- 11- Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación: monitoreo en tiempo real los procesos para controlar las sustancias peligrosas antes de su formación.
- 12- Química intrínsecamente segura: los materiales y sustancias deben ser elegidos para minimizar potenciales accidentes químicos como explosiones, fuegos, fugas, etc.

6. Parámetros, características y normativa para la determinación del carácter “verde” de un disolvente

Para evaluar y clasificar un disolvente como verde, es necesario considerar una serie de parámetros físicos, propiedades moleculares y características estructurales, muchas de ellas mencionadas en el apartado N°4 (Macchia et al., 2023):

- Velocidad de evaporación (volatilidad): referido al tiempo de actuación del disolvente sobre la superficie a eliminar. Un líquido será volátil si cumple con tres condiciones: presión de vapor elevada, bajo punto de ebullición y débil calor latente de vaporización y será poco volátil a la inversa, produciendo el riesgo de ablandar y degradar capas más gruesas (Barros García, 2005).
- Densidad: propiedad de cualquier sustancia, y en cualquier estado de la materia. Expresa la cantidad de masa que existe en un determinado volumen de esa sustancia (Rojo, s. f.).
- Presión de vapor (kPa): parámetro significativo para determinar la velocidad de evaporación. Se define como la presión que alcanza un líquido en un recipiente cerrado cuando se logra un equilibrio entre la cantidad del líquido que pasa al estado de vapor y la cantidad de vapor que retorna al estado líquido (Masschelein-Kleiner, 1994). Cuanto más baja sea la presión de vapor, más lenta será la evaporación (Macchia et al., 2023).
- Penetración/Difusión: Es la capacidad que posee un líquido de penetrar o extenderse verticalmente en un medio más o menos poroso. La velocidad de penetración está ligada a dos parámetros: la tensión superficial y la viscosidad (Cremonesi, 2000).
- Punto de ebullición: temperatura en que un líquido se transforma en vapor debido a que las moléculas del líquido rompen sus enlaces moleculares (Barros García, 2005).

Toxicidad

Se trata de una característica esencial al usar disolventes. Fabricantes, importadores y suministradores deben etiquetarlos para identificar riesgos para la salud o seguridad (Barros García, 2005). Las etiquetas contienen pictogramas de peligrosidad, frases R (riesgos específicos) y S (seguridad en la manipulación). En 2002, se establecieron criterios armonizados bajo el Sistema Mundialmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS), una norma internacional no vinculante (Tarín et al., s. f.). En Europa, el sistema CLP (Classification, Labelling and Packaging) se implementó en 2009 y concluyó en 2015. Las etiquetas GHS incluyen pictogramas, palabras de advertencia, declaraciones de peligro y precaución, identificadores de productos y datos del proveedor, además de información complementaria (Chemical Safety, 2021).

Los pictogramas de peligrosidad se detallan a continuación:



Imagen 3. Pictogramas de peligrosidad (Wikipedia, 2023)

Los pictogramas GHS01-GHS05 representan peligros físicos; GHS06-GHS08, riesgos para la salud; y GHS09, peligros ambientales.

Para determinar la toxicidad de un agente químico, se deben analizar los valores límite de exposición. Dependiendo de la cantidad que penetre en el organismo, todo tipo de sustancia puede volverse potencialmente tóxica, esto dependerá de su toxicidad intrínseca, de su concentración en la atmósfera y del tiempo de exposición (Matteini, 2001). Este último punto es especialmente importante para aquellas sustancias que se acumulan en el organismo de manera acumulativa.

Estos valores no están unificados, ni siquiera en Europa (Prat et al., 2015). En España, se utiliza como criterio de valoración de agentes químicos los valores límites ambientales (VLA). Se trata de valores de referencia para las concentraciones de los agentes químicos en el aire y representan las condiciones en las cuales, la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos día tras día, durante toda su vida laboral, sin sufrir efectos adversos para la salud. La concentración se expresa en partes por millón (ppm) y en mg/m³.

Existen dos tipos de valores límites ambientales (Barros García, 2005):

- Valor Límite Ambiental- Exposición Diaria (VLA-ED): representan condiciones a las cuales se cree, basándose en los conocimientos actuales, que la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos/as 8 horas diarias y 40 horas semanales durante toda su vida laboral, sin sufrir efectos adversos para su salud.
- Valor Límite Ambiental- Exposición de Corta Duración (VLA-EC): constituye un complemento del VLA-ED. Es el valor de referencia para exposiciones de corta duración, es decir, es la concentración media del agente químico en la zona de respiración del trabajador, calculada para cualquier período de 15 minutos a lo largo de la jornada laboral.

Los valores y su toxicidad se detallan a continuación:

- < 25: elevada toxicidad.
- 50 - 100: toxicidad media.
- 100 – 1000: poco tóxico.

Los efectos o patologías que puede sufrir una persona por exposición prolongada son:

- Efectos irritantes en la piel y mucosas.
- Efectos en el aparato reproductivo femenino o masculino.
- Efectos cancerígenos/mutagénicos.

En general, se indica que en restauración los disolventes utilizados deben tener un valor límite de 200 ppm o superior (Barros García, 2005). Se ha descartado el uso de muchos disolventes por su alta toxicidad como los hidrocarburos clorados (cloroformo, tetracloruro de carbono, tricloroetano, etc.), nitroderivados (1-nitropropanona), éteres, aminas (butilamina-5 ppm), piridina (5 ppm), morfolina (10 ppm), N-N- dimetilformamida (10 ppm) y éteres de glicoles (éter monoetílico del etilenglicol, etc.). Otros disolventes se han dejado de utilizar por ser cancerígenos como el benceno y el tricloroetileno. Sin embargo, existen otros de difícil sustitución en restauración y muy utilizados pese a su toxicidad como son los hidrocarburos. El uso de los disolventes aromáticos como el tolueno o el xileno se han ido abandonando ya que presentan un VLA-ED de 50 ppm. Para el White Spirit es difícil determinar un valor ya que contiene una mezcla de diferentes hidrocarburos (Barros García, 2005).

Las fichas de seguridad de cada producto pueden presentar indicadores de toxicidad diferente en relación a las pruebas que se hayan efectuado de esa sustancia química. Por ejemplo, existen fichas que no contienen valores VLA pero si DNEL o que presentan valores DL.

DNEL (Nivel Sin Efecto Derivado): nivel de exposición a la sustancia por debajo del cual no se espera que ocurran efectos adversos. Es derivado porque normalmente se calcula sobre la base de los descriptores de dosis disponibles de estudios en animales. Existen varias medidas de DNELs: para trabajadores/consumidores, vía inhalatoria/dérmica/oral, efecto Local/Sistémico, Crítico (Chemwatch, s. f.).

DL: abreviatura de dosis letal. En las fichas de seguridad suele aparecer la DL_{50} que es la dosis letal media. Es calculada mediante pruebas de toxicidad en animales de laboratorio que son expuestos a diferentes dosis de una sustancia química para luego observar la cantidad de muertes en un período de tiempo determinado. Finalmente se calcula la dosis que mató al 50% de los animales y se expresa como la DL_{50} . Se utiliza para evaluar la toxicidad aguda de las sustancias químicas y para establecer límites de exposición seguros para los trabajadores (Capacitación industrial, s. f.).

Por último, los compuestos orgánicos volátiles (VOC-Volatil Organic Compounds) son un aspecto clave. La normativa europea (Consejo de la Unión Europea, 1999) lo define como cualquier compuesto orgánico que tenga una presión de vapor superior a 0,01 kPa a 20°C.

A su vez, la Organización Mundial de la Salud (OMS), divide los VOCs en:

- Compuestos orgánicos muy volátiles (VVOC) Tº de ebullición de 0 a 50/100°C,
- Compuestos orgánicos volátiles (VOC) Tº de ebullición de 10-100 a 240-260°C,
- Compuestos orgánicos semivolátiles (SVOC) Tº de ebullición de 260-400°C.

Macarena Collazo Inglesini – Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE. Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias filmógenas

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2023-2024

Sistemas de evaluación

Existen sistemas de evaluación sobre el carácter verde de las sustancias que utilizan datos de seguridad y salud ambiental (EHS³ o SHE) como el **SAFER CHOICE** (EPA, s. f.) establecido por EPA⁴, que asigna una etiqueta a aquellos productos que cumplan con el estándar de Safer Choice y con ciertos criterios de seguridad. De esta manera publica una lista de sustancias más seguras clasificándolas con un símbolo y un color:

● **Círculo verde:** la sustancia química fue verificada y tiene una importancia mínima en el producto final según datos experimentales y diseñados.

◐ **Círculo medio verde:** se espera que la sustancia química sea de importancia media. Datos adicionales podrían aumentar la confianza en el estado de seguridad.

▲ **Triángulo amarillo:** la sustancia química cumple con los criterios de Safer Choice de su clase de ingrediente funcional, pero presenta algunas cuestiones de perfil de riesgo. Si bien es la mejor sustancia química de su clase y está entre las más seguras que se encuentran disponibles, no debe considerarse como un área de innovación química segura.

■ **Cuadrado gris:** es posible que este químico no sea aceptable para su uso en productos que son candidatos para la etiqueta de Safer Choice y es posible que cualquier producto etiquetado actualmente que lo contenga deba reformularse según los programas de cumplimiento de Safer Choice.

La evaluación del ciclo de vida (**LCA**) es otro enfoque que cuantifica los impactos en función del potencial de exposición. Tiene en cuenta todas las etapas de la vida de un disolvente desde su fabricación, transporte, uso y eliminación (Fife, 2021).

Otro sistema es el **CHEM21** (creado por el Consorcio Europeo Innovative Medicines Initiatives) que clasifica en 4 grupos a las sustancias: recomendadas, problemáticas, peligrosas y muy peligrosas. Esta clasificación se basa en una evaluación comparativa de las guías existentes dando como resultado un criterio de Seguridad, uno de Salud y uno de Medio Ambiente. Esta evaluación debe ser coherente con la clasificación de disolventes más utilizados en la industria que están registrados en REACH⁵. Cada criterio es puntuado de 1 a 10, representando el 10 el mayor peligro en cada categoría. Luego a esta puntuación se asoció un código de colores y una palabra:

- Recomendados o preferidos (color verde): disolventes que deben probarse primero en un ejercicio de selección.
- Problemáticos (color amarillo): disolventes que pueden utilizarse en el laboratorio, pero su aplicación en la planta piloto o a escala de producción requerirá medidas específicas, o un consumo de energía importante.

³ Environmental health and safety.

⁴ United States Environmental Protection Agency.

⁵ Reglamento (CE) nº 1907/2006: Reglamento de registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas. Tiene como principal objetivo mejorar la protección para la salud humana y el medio ambiente frente al riesgo que puede conllevar la fabricación, comercialización y uso de las sustancias y mezclas químicas (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2006)

- Peligrosos (rojo): la sustitución de estos disolventes durante el desarrollo del proceso es una prioridad.
- Muy peligrosos (rojo): disolventes que deben evitarse, incluso en el laboratorio.

Sin embargo, este sistema de puntuación sigue siendo incompleto ya que no contempla la toxicidad aguda para la vida acuática, la bioacumulación, la capacidad de generar compuestos orgánicos volátiles (VOC) nocivos y una métrica para evaluar el impacto de su síntesis en el CO₂, reciclado y eliminación (Prat et al., 2015).

De esta manera, la guía CHEM21 cuenta con 14 disolventes recomendados, 17 problemáticos y 22 disolventes peligrosos o muy peligrosos. En el artículo *CHEM21 Selection guide of classical and less classical solvents* (Prat et al., 2015) se detalla una tabla con los disolventes clásicos y aquellos menos comunes y su ranking. Esta tabla se puede consultar en el Anexo I.

Cabe destacar que este trabajo no pretende analizar exhaustivamente los parámetros de evaluación ni valorar clasificaciones, sino brindar herramientas para que los restauradores puedan elegir disolventes más sostenibles. También se subraya el interés creciente por soluciones ecológicas en la Preservación del Patrimonio Cultural, alineadas con iniciativas como el Green Deal de la UE, que promueven abandonar polímeros sintéticos y disolventes a base de petróleo en favor de biomateriales (Casini et al., 2023).

7. Disolventes verdes y su comparativa

La sustitución de los disolventes tradicionales por disolventes verdes o ecológicos constituye un enorme desafío que debe resolver una serie de problemáticas. Dentro de las mismas se encuentran: la reducción de la permeabilidad del disolvente en las capas subyacentes de la pintura, la retención del disolvente para evitar el hinchamiento y reblandecimiento del aglutinante y la lixiviación. Los disolventes verdes deben presentar un equilibrio que contemple la salud del restaurador, el cuidado del medio ambiente, la eficacia en el proceso de limpieza y la inocuidad para la obra de arte (Macchia et al., 2021).

La revisión bibliográfica realizada ha permitido obtener una selección de doce disolventes verdes que actualmente se utilizan en intervenciones de restauración. Los mismos se enumeran a continuación:

- (1) Carbonato de Propileno
- (2) DBE
- (3) Dimetil Carbonato
- (4) Dioxolano
- (5) D-Limoneno
- (6) Ethylal
- (7) Etil L-Lactato
- (8) Green Rescue
- (9) Pelargonato de 2-etilhexilo
- (10) Solketal
- (11) TOU
- (12) γ -valerolactona (GVL)

Con el objetivo de resumir y comparar las características más relevantes de cada disolvente, se expone una tabla que recoge la información de manera abreviada. Se recopila la información vinculada con las propiedades físico-químicas, los datos de toxicidad, del medio ambiente, los símbolos de peligrosidad, la clasificación según los sistemas de evaluación y finalmente la información comercial. La información detallada se encuentra en el Anexo II.

Seguidamente a esta tabla se expone la tabla Nº4 con el detalle de los parámetros de solubilidad de los disolventes verdes especificando las fuentes consultadas y posteriormente un gráfico con su ubicación en el Triángulo de Teas, elaborado con el software Trisolv (Coladonato & Scarpitti, 2022).

Disolvente	Densidad (g/cm ³)	Punto de ebullición (°C)	Presión de vapor (kPa)	Olor	DL ₅₀ oral (mg/Kg)	DL ₅₀ cutáneo (mg/Kg)	VLA-ED (ppm)	Toxicidad	Presencia de VOC	Biodegradable	De fuentes renovables	Inflamable	Símbolos de peligrosidad	CHEM21	Safer Choice EPA	Proveedor	Precio por l (€)
Carbonato de propileno	1,2	242	0,040	No	>5000	>2000	-	Baja	28%	Si	No	No	H319	Problemático	Si (Posee etiqueta "Safer Choice")	CTS España S.L.	10,89
DBE	1,09	196-225	0,008	Bajo (a frutas)	5000	5000	-	Baja	0%	Si	Si (55%)	No	Ninguno	No clasificado	Si (Posee etiqueta "Safer Choice")	CTS España S.L.	11,25
Dimetil Carbonato	1,07	86-89	2,400	Bajo	>5000	>2000	-	Baja	Según el Consejo de la Unión Europea, la sustancia presentaría VOC.	Si	No	Si	H225	Recomendado	No clasificado	Fisher Scientific S.L.	68,6
1,3-Dioxolano	1,064	75-76	9,300	Similar al éter	5200	15000	20	Posiblemente alta (sospecha de fetotoxicidad y mutágeno)	100%	No	No	Si	H225-H319-H360	No clasificado	No clasificado	Fisher Scientific S.L.	74,7
D-Limoneno	0,84	175-178	0,020	Si (limón)	5300	-	-	Baja	Según el Consejo de la Unión Europea, la sustancia presentaría una mínima cantidad de VOC.	Si	Si	Si	H226-H315-H317-H410	Problemático	pero presenta alguna cuestión de perfil de riesgo	Factorchem®	48,5
Ethylal	0,83	88	17,000	Agradable	3536	-	-	Baja	100%	No	Si (86%)	Si	H225	No clasificado	No clasificado	Carl Roth®	69,8
Etil L-Lactato	1,034	154	0,160	Medio	>2000	-	-	Baja	100%	Si (70%)	Si	Si	H226-318-335	Problemático	Si (Posee etiqueta "Safer Choice")	CTS España S.L.	22,26
Green Rescue	1,04	140	4,200	Bajo	4300	-	-	Posiblemente alta (posee Dioxolano y TOU)	100%	No	No	Si	H225-H319	No clasificado	No clasificado	Lab4green	-
Pelargonato de 2-etilhexilo	0,864	311,8	0,090	-	-	-	-	-	Según el Consejo de la Unión Europea, la sustancia presentaría VOC.	Si	Si	No	H302-H315-H319-H335	No clasificado	No clasificado	Cymit Química S.L.	885,72
Solketal	1,063	188	14,300	No	7000	>2000	-	Posiblemente alta (sospecha de daño al feto)	100%	No fácilmente (25% en 28 días)	Si	Baja inflamabilidad	H319- H361d	No clasificado	No clasificado	Fisher Scientific S.L.	172
TOU	0,9921	201,5	0,022	Si	>5000	>2000	-	Estudio en curso posiblemente categorizado CRM cat.2	Según el Consejo de la Unión Europea, la sustancia presentaría una mínima cantidad de VOC.	No (4,3% en 28 días)	No	No	Ninguno	No clasificado	No clasificado	Carl Roth®	71,95
Y-Valerolactona	1,05	207-208	0,044	Característico a hierbas	9249	>2102	-	Baja	Según el Consejo de la Unión Europea, la sustancia presentaría una mínima cantidad de VOC.	Si	Si	No	H315-H319	Problemático (por falta de información)	No clasificado	Fisher Scientific S.L.	234

Tabla 3. Comparativa de disolventes verdes

Disolvente	Parámetros de solubilidad		
	Fd	Fp	Fh
Carbonato de propileno ¹	48	38	14
DBE ²	53	15	32
Dimetil Carbonato ³	53	13	34
Dioxolano ²	46	22	32
D-Limoneno ³	74	8	18
Ethylal ²	56	18	26
Etil L-Lactato ³	44	21	35
Green Rescue ²	51	19	30
Pelargonato de 2-etilhexilo ⁴	77	15	8
Solketal ⁴	43	20	37
TOU ²	50	20	30
γ-Valerolactona ⁴	46	33	21

¹ (CTS®, s.f.-b).

² (Macchia et al., 2021)

³ (Fife, 2021)

⁴ (Melchiorre et al., 2023)

Tabla 4. Parámetros de solubilidad de los disolventes verdes

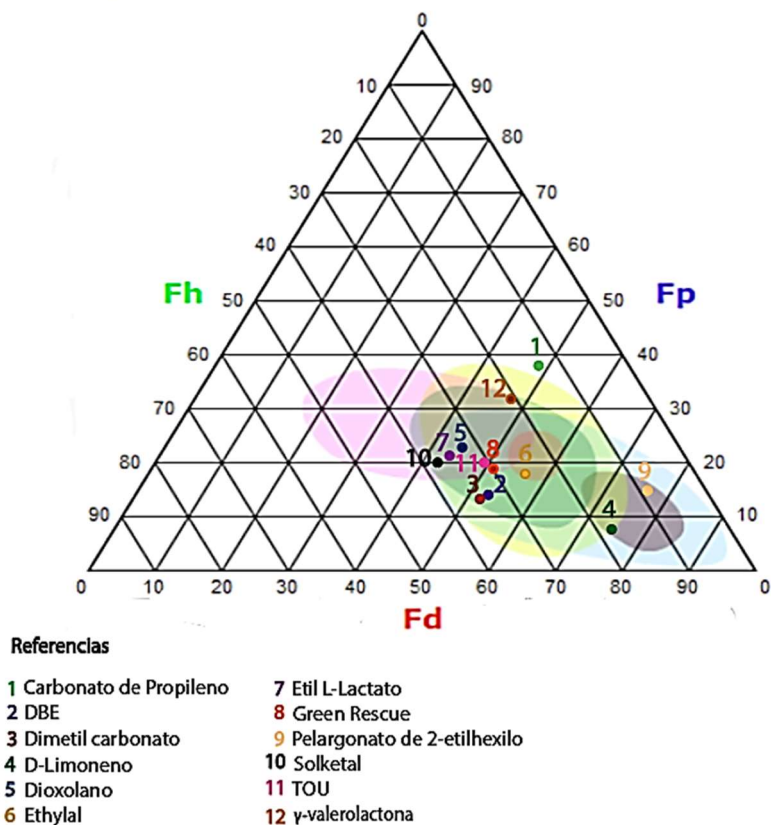


Imagen 4. Ubicación de los disolventes verdes en el triángulo de solubilidad

8. Casos de estudio

La totalidad de los disolventes listados con anterioridad han sido objeto de pruebas y/o estudios en el ámbito de la conservación-restauración. Sin embargo, estos estudios son recientes y bastante escasos.

Uno de los más relevantes es el artículo *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021). En este estudio se realizan pruebas de limpieza sobre diferentes barnices (Paraloid®, PVA, Dammar y barniz de retoque) utilizando distintos disolventes (Metilal, dioxolano, TOU, DBE, Acetona, MEK, Carbonato de propileno, Ethylal y Green Rescue).

Para evaluar la fase de limpieza y sus parámetros (limpieza, evaporación del disolvente, tiempo, satisfacción) se asignaron valoraciones: excelente (10), bueno (8), suficiente (6), mediocre (4) e insuficiente (2) para ser puntuados por 5 restauradores.

La limpieza fue realizada con hisopos de algodón. Para evaluar el factor tiempo, el restaurador definió el número de pasadas necesarias para una limpieza óptima, marcando con “excelente” el número mínimo de pasadas y con “mediocre” un número elevado.

Para verificar la limpieza y estudio de los posibles residuos se utilizó fotografía UV, colorimetría y FTIR en reflectancia total atenuada (ATR)

A continuación, se detallan las valoraciones y los resultados de las pruebas:

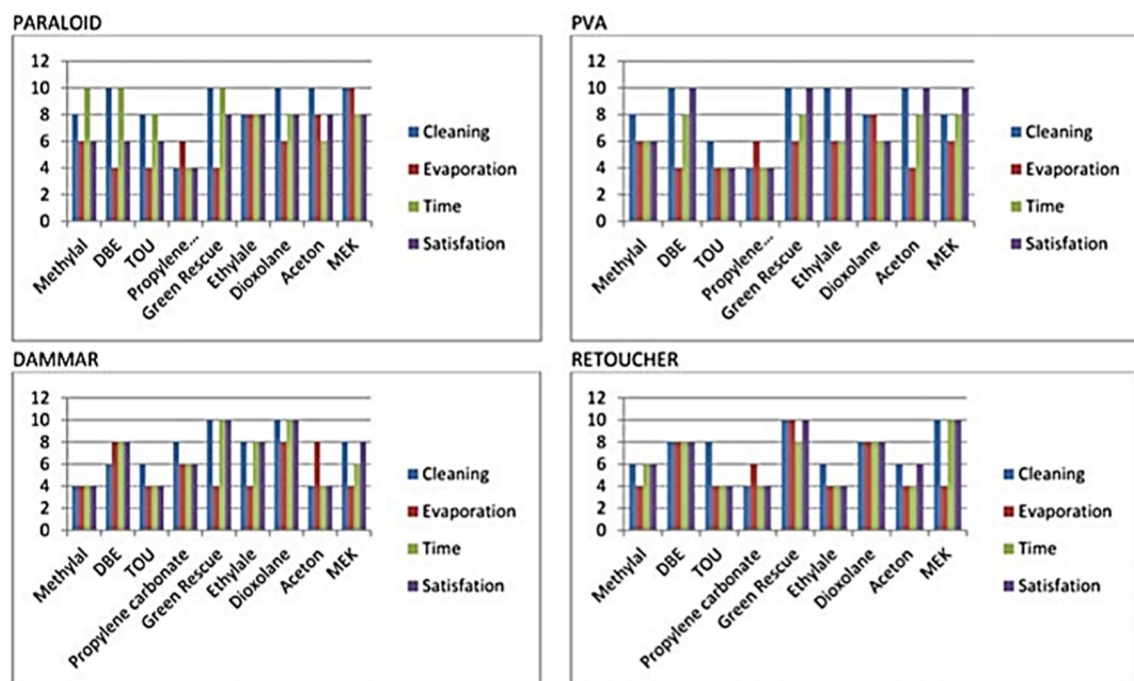


Imagen 5. Valores atribuidos por los restauradores durante la limpieza (Macchia et al., 2021)

En esta instancia, los productos que más convencieron a los restauradores en general para todos los barnices fueron **MEK** y **Green Rescue**, aunque el primero presenta una evaporación elevada

que condiciona su uso. El resto de los disolventes se juzgaron con buenos resultados y satisfacción para casos específicos de limpieza. El producto que mostró los peores resultados fue el carbonato de propileno.

Los análisis colorimétricos demostraron que MEK y Green Rescue poseen gran capacidad de eliminación sobre los diferentes barnices sin alteración de colores.

Finalmente, en relación a los residuos de barniz, Green Rescue mostró una elevada acción disolvente definida por la ausencia de residuos. El carbonato de propileno dejó residuos de Paraloid® y PVA distribuidos uniformemente mientras que los demás disolventes dejaron residuos distribuidos heterogéneamente en las zonas de limpieza.

El artículo, detalla los resultados de la presencia de residuos de barnices en una tabla, estableciendo los siguientes significados:

(-) Desaparición total de los picos de los barnices

(+) Disminución significativa de la intensidad de los picos

(+++) Disminución de la intensidad de los picos

(+++++) Sin efecto

	Methylal	Dioxolan	TOU	DBE	Acetone	M E K	Propylene carbonate	Ethylal	Green Rescue
Paraloid	+++	+	+	+	+	+	++	+	-
PVA	+	+	++	-	-	-	++++	-	-
Dammar	++	-	+	+	+++	-	++	+	+
Retoucher	+	+	++	+	++	-	++	++	-

Tabla 5. Presencia de residuos identificados por espectros IR (Macchia et al., 2021)

También se realizó una valoración final de los resultados obtenidos en las pruebas. En la tabla Nº6 se resumen aspectos como la eliminación de las distintas sustancias, el análisis colorimétrico, las fotografías UV y la información obtenida con el FTIR. Una mayor cantidad de + representa una mayor eficacia en la eliminación del producto.

	Methylal	Dioxolan	TOU	DBE	Acetone	M E K	Propylene carbonate	Ethylal	GREEN RESCUE
Paraloid	+++	+++	++	++	+++	++++	+	+++	++++
PVA	+++	++	++	++	++	++++		++	++
Dammar	+	++	+	++	+	+++	+	+	+++
Retoucher	++	++	++	+	++	++++	+	++	+++

Tabla 6. Resultados finales de la experimentación (Macchia et al., 2021)

Los resultados de las pruebas determinaron que MEK seguido de Green Rescue fueron los dos disolventes que más sirvieron en la remoción de las cuatro sustancias. El Carbonato de propileno fue el disolvente que peor resultados dio, siendo completamente incapaz de remover el PVA y poco eficiente en la remoción del Paraloid®, la resina dammar y el barniz de retoque.

A partir de los resultados obtenidos, se eligieron los disolventes MEK y Green Rescue para utilizar sobre dos pinturas al óleo recubiertas con barniz dammar del siglo XVII y XIX italianas.

Otro de los estudios más importantes aplicando disolventes verdes en procesos de limpieza se detalla en el artículo *Green solvents and restoration: Application of biomass-derived solvents in cleaning procedures* (Melchiorre et al., 2023).

En este estudio se expone la utilización de 3 disolventes ecológicos: solketal (SOLK), γ -valerolactona (GVL) y Pelargonato de 2-etilhexilo (ARGO) producidos a partir de biomasa y materias primas renovables (hidratos de carbono, lignocelulosa y aceites vegetales agotados) y sus mezclas en reemplazo de los disolventes más utilizados (acetona, etanol e isooctano).

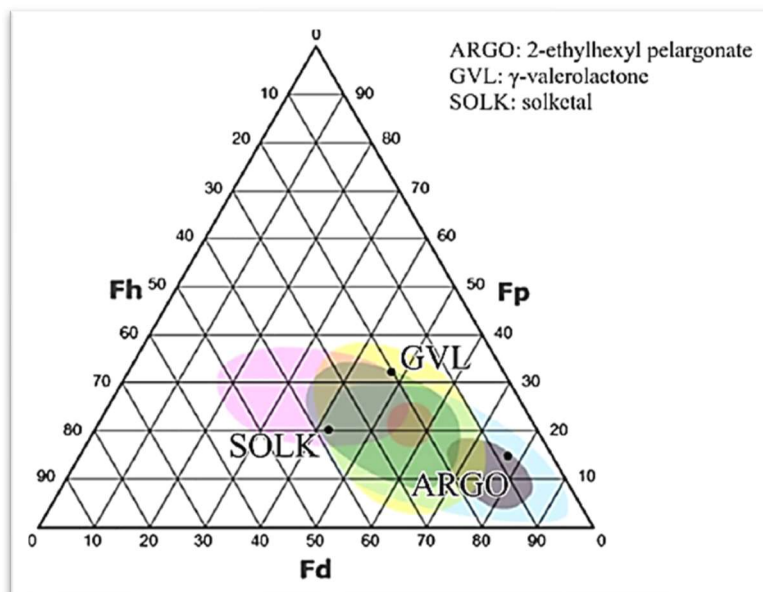


Imagen 6. Tríada de disolventes ecológicos (Melchiorre et al., 2023)

Se confeccionaron muestras por duplicado sobre portaobjetos de vidrio utilizando sustancias filmógenas (Dammar, Mastic, Shellac, Paraloid® B-72 y pigmento aglutinado con aceite de linaza). Las muestras se dejaron secar y fueron bruñidas. La mitad de ellas fueron sometidas a un envejecimiento artificial acelerado.

Los métodos de medición utilizados fueron: fotografías visibles y bajo radiación UV y análisis termogravimétrico para evaluar la velocidad de evaporación.

La limpieza se realizó depositando gotas de los disolventes sobre los portaobjetos durante diferentes tiempos, que luego se retiraron con un hisopo de algodón seco, para evitar la fricción mecánica.

Los resultados de la limpieza se detallan a continuación:

ARGO: no interactuó con Shellac, Paraloid® B-72 y el aceite de linaza, pero sí tuvo afinidad con Dammar y Mastic.

GVL y SOLK: solubilizaron todos los revestimientos excepto el pigmento aglutinado con aceite de linaza que parecía estar algo polimerizado.

Además de las pruebas de limpieza, se evaluó la humectación y penetración de los disolventes en la capa pictórica aplicando una gota de cada disolvente sobre las muestras y posteriormente controlando el cambio de volumen en el tiempo. El disolvente ARGO fue difícil de medir debido a su elevada velocidad de difusión sobre el sustrato y el bajo ángulo de contacto. SOLK no pudo ser medible en la muestra sin barnizar y en la recubierta por Shellac por la misma razón que ARGO. Sin embargo, para las muestras recubiertas con Dammar, Mastic y Paraloid, mostró una disminución del volumen del 25-30%.

Finalmente, la gota de GVL fue la que mostró la menor disminución de volumen en contacto con todas las muestras (25%), excepto en la muestra sin barnizar donde la disminución fue de un 45%. Esto indicó que su difusión en la capa pictórica fue la menor entre los disolventes verdes testeados.

El estudio también contempló pruebas sobre una pintura al óleo sobre tabla del siglo XVI de un *Ecce Homo*, que presentaba un barniz terpénico natural oxidado. Se realizó una comparación entre disolventes tradicionales y los disolventes ecológicos y sus mezclas. En este caso, también se utilizaron hisopos de algodón como método de aplicación.

La eficacia en la eliminación del barniz se evaluó mediante luz visible y fluorescencia UV.

Los resultados de la limpieza bajo luz visible permitieron observar que las mezclas de disolventes clásicos produjeron una pérdida de brillo en la superficie de la pintura, mientras que las mezclas de disolventes verdes no modificaron el índice de refracción de la superficie. Otro de los resultados del proceso de limpieza fue que una de las mezclas de disolventes clásicos produjo la solubilización parcial del barniz sin su completa eliminación, hecho que no ocurrió con la mezcla verde que lo eliminó por completo. Esto se debió posiblemente a la rápida evaporación de los disolventes tradicionales y a la falta suficiente de tiempo de contacto para la solubilización del barniz.

Un tercer estudio relacionado con la limpieza de pinturas al óleo es: *The Green Attitude in Art Conservation: Polyhydroxybutyrate-based Gels for the Cleaning of Oil Paintings* (Samorì et al., 2016). En él, se analiza la eficacia limpiadora de los organogeles para eliminar películas protectoras envejecidas de la superficie de pinturas. Se utilizan compuestos de origen biológico como: poli-3-hidroxibutirato (PHB) como agente gelificante, γ -valerolactona (GVL) como disolvente y citrato de trietilo (TEC) como plastificante.

Para analizar el comportamiento de la gelificación, se efectuaron análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC), mediciones de dispersión de rayos X de ángulo ancho (WAXS), microscopía electrónica de barrido (SEM). Para evaluar la evaporación del disolvente se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) isotérmico, cromatografía de gases y espectrometría de masas para evaluar las trazas de residuos.

El gel se probó inicialmente en simulacros que se prepararon con una capa de dammar envejecida artificialmente sobre una pintura al óleo envejecida naturalmente hace 40 años. La utilización del gel se comparó con la aplicación pura del GVL aplicado con un hisopo de algodón.

Se pudo comprobar la eficacia de la limpieza del gel de PHB con el disolvente GVL, aunque se obtuvieron los mismos resultados con la limpieza utilizando el GVL puro. La diferencia radicó en el análisis de trazas de residuos de los dos métodos. Después de 24 horas de la aplicación, el GVL detectado aplicado mediante el gel de PHB era de aproximadamente 0,1% en peso, mientras que la cantidad que quedaba de GVL puro fue tres veces mayor. Es decir que los geles de PHB permitieron controlar la liberación de GVL, reduciendo la retención en las capas de pintura y minimizando los riesgos de hinchamiento.

Otra prueba importante que se realizó en este estudio fue la posibilidad de reciclar los geles PHB utilizados. Para ello, se precipitó el polímero con acetona. GVL se recuperó de la solución de acetona mediante destilación, lo que permitió la recuperación global de ambos componentes: GVL y PHB. Además, se observó la fácil biodegradabilidad de los geles en agua, alcanzando un valor final del 75% tras 28 días.

En conclusión, la baja toxicidad de los tres componentes, su biodegradabilidad y su fácil manipulación, ofrecen una excelente opción en la limpieza de obras policromadas.

Otro estudio en donde se realizan pruebas con disolventes verdes es *Towards sustainable museum conservation practices: A study on the Surface cleaning of contemporary art and design objects with the use of biodegradable agents* (Kampasakali et al., 2021) .

Este estudio se centró en la limpieza de plásticos: polimetacrilato de metilo (PMMA), ácido poliláctico (PLA), polipropileno (PP) y cloruro de polivinilo plastificado (pPVC), algunos de ellos utilizados en impresiones 3D aplicando: agua desionizada, un quelato (MGDA), un tensoactivo no iónico y dos disolventes: limoneno y lactato de etilo.

Los métodos de medición utilizados fueron: microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM). Adicionalmente se hicieron mediciones con Raman y de brillo para la evaluación de la limpieza.

Las muestras de los plásticos se ensuciaron artificialmente con dos tipos de depósitos con el fin de simular partículas de suciedad tipo carbón y manchas de sustancias aceitosas y huellas dactilares tipo sebo.

Solo se expondrán los resultados obtenidos para el limoneno y el lactato de etilo que son los disolventes mencionados en el trabajo:

El limoneno tuvo un resultado muy bueno en la limpieza de la superficie del PLA para ambos tipos de suciedad y la cantidad de residuos fue insignificante. En la superficie del PMMA, quedaron residuos en superficie luego de la limpieza que posteriormente se quitaron con un paño seco. La limpieza de ambos tipos de suciedad se consideró satisfactoria. Para el caso del PP, el uso del limoneno provocó algunas alteraciones superficiales menores no observables a simple vista. Su eficacia en la limpieza fue buena en general, aunque mejor contra la suciedad de sebo, sin dejar residuos. Finalmente, para el caso del PVC plastificado, se observaron

variaciones topográficas en la superficie, provocando pequeñas arrugas o alteración de la distribución y morfología de las partículas superficiales. Esta alteración se debió a la distancia de solubilidad relativamente pequeña entre el disolvente y el plastificante.

El lactato de etilo fue muy perjudicial para el PLA. El estudio demostró un alto grado de hinchamiento luego de 24 horas de inmersión de la película de PLA en lactato de etilo, acompañado de una disminución de su densidad. Para la superficie del PP, el lactato de etilo mostró excelentes resultados para ambos tipos de suciedad, sin dejar residuos de limpieza. Los mismos resultados satisfactorios se obtuvieron sobre la superficie del PVC. Por último, para el PMMA, se observaron cantidades considerables de residuos.

Para la medición del brillo de los plásticos antes y después de la limpieza se utilizó un brillómetro Rhopoint NOVO GLOSS 20/6085. Las mediciones arrojaron resultados satisfactorios en la mayoría de los casos manteniéndose el brillo muy próximo a los originales. Se concluye finalmente en el estudio, que la variación más significativa de brillo fue el resultado de una limpieza inadecuada y no de un proceso agresivo por parte de los agentes de limpieza.

9. Fase experimental

Para el desarrollo de la fase experimental se realizó una selección de disolventes a testear a partir de los datos recogidos en la tabla comparativa (Tabla Nº3) y del análisis de los casos de estudio. También se seleccionó una serie de sustancias filmógenas a eliminar. Las pruebas de limpieza se efectuaron sobre las probetas de estas sustancias y sobre una obra original.

El software utilizado para hacer todos los triángulos de solubilidad de Teas que figuran en el trabajo, tanto en la fase teórica como en la experimental y que son de elaboración propia, fue el Trisolv (Coladonato & Scarpitti, 2022).

9.1. Elección de disolventes

La primera etapa de la fase experimental consistió en seleccionar disolventes verdes como alternativa sostenible frente a la tríada de Cremonesi. La elección fue compleja, ya que se debían considerar diversos aspectos.

A partir de la información bibliográfica y la tabla comparativa (Tabla Nº3), se concluyó que no existe un disolvente que cumpla con todas las características deseadas: ser biodegradable, de baja toxicidad, provenir de fuentes renovables, no ser volátil, ser VOC free, no tener símbolos de peligrosidad o poseer símbolos menos dañinos, y estar fácilmente disponible a un precio accesible. Además, los disolventes seleccionados debían cubrir diferentes zonas de solubilidad para la remoción de sustancias filmógenas.

Los disolventes que se descartaron para la fase experimental y el motivo de su exclusión se detallan a continuación:

Pelargonato de 2-etilhexilo/Solketal/Y-Valerolactona: si bien los resultados expuestos en el artículo *Green solvents and restoration: Application of biomass-derived solvents in cleaning procedures* (Melchiorre et al., 2023) fueron muy buenos, no son fácilmente accesibles comercialmente y su precio es muy elevado.

Green Rescue: al igual que con el caso anterior, si bien las pruebas realizadas plasmadas en el estudio de Macchia (Macchia et al., 2021) fueron prometedoras, se trata de un disolvente no comercializado en España y de difícil acceso. Adicionalmente, se menciona que se produce mediante una mezcla de disolventes, entre los que se encuentra el TOU que tiene un estudio de toxicidad en curso y puede ser clasificado como CRM categoría 2.

El dioxolano se descartó al no provenir de fuentes renovables, no ser fácilmente biodegradable, por poseer un VLA bajo y finalmente por existir sospechas de feto-toxicidad y posible mutágeno.

El dimetil carbonato se descartó por no provenir de fuentes renovables, por su precio medianamente elevado.

El ethylal tampoco se seleccionó para la fase experimental por ser un disolvente volátil y poseer un precio más elevado que otros.

El etil L-Lactato, si bien presenta muy buenas características generales, se descartó de las pruebas por poseer varios símbolos de peligrosidad.

El TOU también se descartó por lo antes mencionado: su posible toxicidad que se comprobaría al finalizar el estudio OECD TG 422 (Anexo III).

En conclusión, la información técnica y de seguridad recolectada como así también los resultados de los estudios y pruebas mencionadas han permitido seleccionar los siguientes disolventes verdes:

Disolvente	DBE	D-Limoneno	Carbonato de propileno
Ventajas	● De fuentes renovables. ● Biodegradable. ● VOC free. ● Baja toxicidad. ● No inflamable. ● Sin símbolos de peligrosidad. ● Evaporación lenta. ● Fácilmente accesible. ● Precio económico.	● De fuentes renovables. ● Biodegradable. ● VOC muy bajo. ● Baja toxicidad. ● Evaporación lenta. ● Fácilmente accesible. ● Precio medianamente económico.	● Biodegradable. ● VOC muy bajo (28%) ● Baja toxicidad. ● No inflamable. ● Sólo presenta un símbolo de peligrosidad (H319). ● Evaporación lenta. ● Fácilmente accesible. ● Precio económico.
Desventajas	● No es de los disolventes más efectivos según los estudios.	● Inflamable. ● Posee varios símbolos de peligrosidad. ● Es un alqueno que envejece produciendo sustancias insolubles y cromóforas.	● No se obtiene de fuentes renovables. ● En el estudio de Macchia (Macchia et al., 2021) es el disolvente que presenta los peores resultados de limpieza.

Tabla 7. Disolventes verdes por testear: ventajas y desventajas.

Los parámetros de solubilidad de los disolventes seleccionados y su ubicación en el triángulo de Teas se detallan a continuación:

Ref.	Disolvente	Fd	Fp	Fh
A	DBE	53	16	32
B	D-Limoneno	74	8	18
C	Carbonato de propileno	48	38	14

Tabla 8. Parámetros de solubilidad disolventes verdes

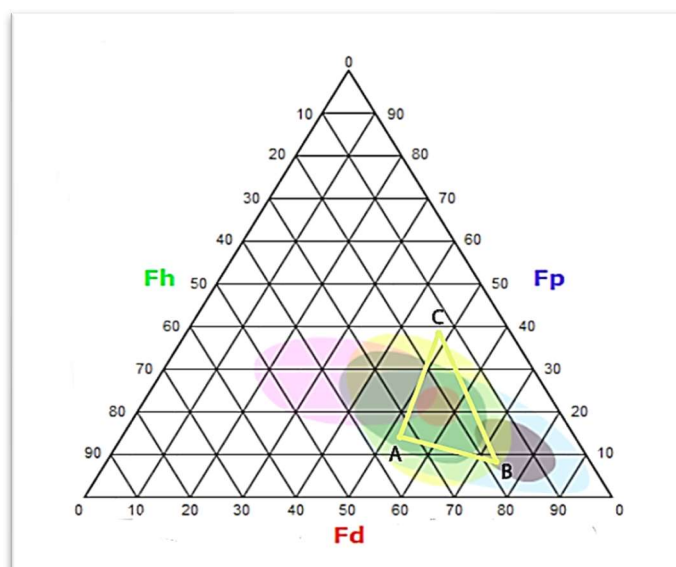


Imagen 7. Tríada de disolventes verdes seleccionados (DBE, D-limoneno, Carbonato de propileno)

La nueva zona de acción de la tríada de disolventes verdes seleccionada abarca un área menor de solubilidad respecto a la propuesta por Cremonesi. Esto presenta una limitación en la remoción de determinadas sustancias. Sin embargo, se persigue determinar si para parámetros de solubilidad iguales o similares se logran resultados parecidos. De ser así, se presentaría como una alternativa menos perjudicial para el medio ambiente y menos tóxica para los restauradores.

Los parámetros de solubilidad de la tríada propuesta por Cremonesi y su ubicación en el triángulo de Teas se detallan a continuación:

Ref.	Disolvente	Fd	Fp	Fh
A	Etanol	36	18	46
B	Isooctano	98	1	1
C	Acetona	47	32	21

Tabla 9. Parámetros de solubilidad disolventes Test de Cremonesi

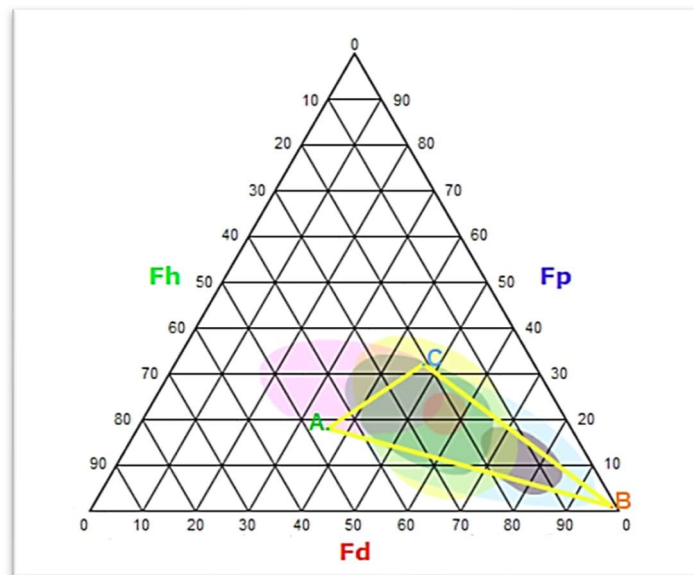


Imagen 8. Triada de disolventes de Cremonesi (Etanol, isooctano y acetona)

Por último, se exponen las áreas de solubilidad de ambas triadas de manera superpuesta para identificar más fácilmente los límites de cada una.

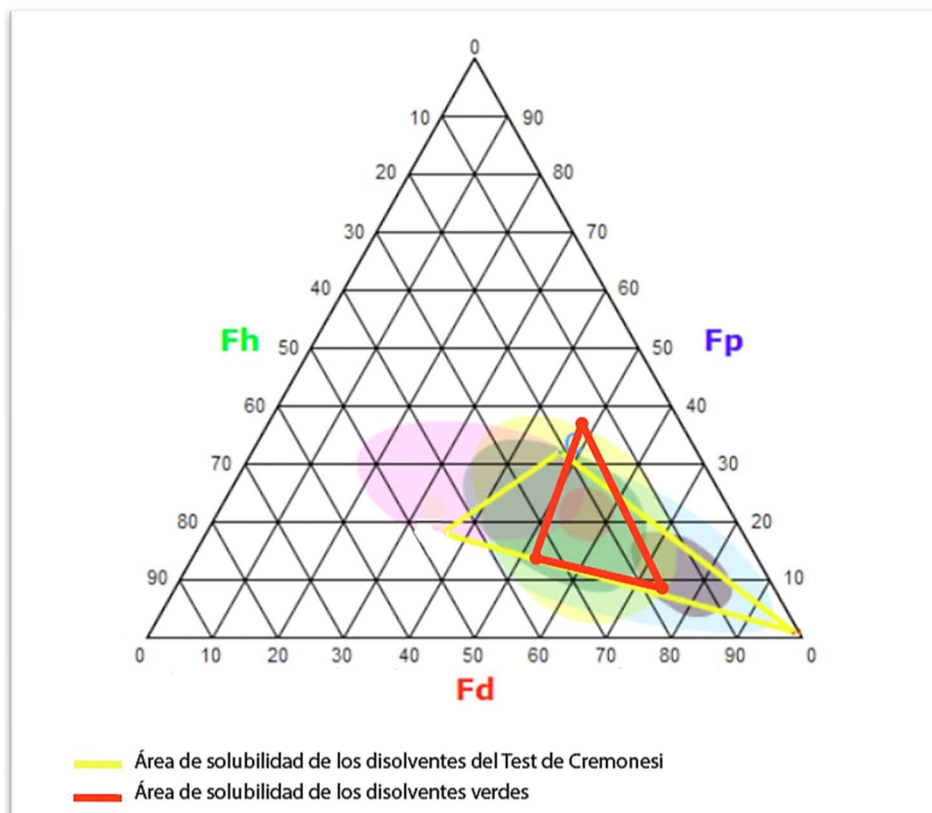


Imagen 9. Área de solubilidad del Test Cremonesi y de los disolventes verdes

Finalmente, para poder concebir mejor las principales diferencias entre los disolventes del Test de Cremonesi y las alternativas verdes sugeridas, se exponen algunos datos que se consideran relevantes para su elección.

El D-Limoneno como alternativa al isooctano:

Propiedades	D-Limoneno	Isooctano ¹
Densidad (g/cm ³)	0,84	0,69
Punto de ebullición (°C)	175-178	99,2
Presión de vapor (Kpa)	0,02	2,8
VOC	Si (muy bajo)	Si (100%)
Biodegradable	Si	No
De fuentes Renovables	Si	No
Inflamable	Si	Si
Símbolos de peligrosidad	H226-H315-H317-H410	H225-H304-H315-H336-H410

¹(Carl Roth GmbH, 2024e)

Tabla 10. Comparativa D-Limoneno e isooctano

El Carbonato de propileno como alternativa a la acetona:

Propiedades	Carbonato de propileno	Acetona ¹
Densidad (g/cm ³)	1,2	0,79
Punto de ebullición (°C)	242	56,05
Presión de vapor (Kpa)	0,04	24
VOC	28%	Si (100%)
Biodegradable	Si	No
De fuentes Renovables	No	No
Inflamable	No	Si
Símbolos de peligrosidad	H319	H225-H319-H336

¹(Carl Roth GmbH, 2024a)

Tabla 11. Comparativa carbonato de propileno y acetona

El DBE como alternativa al etanol:

Propiedades	DBE	Etanol ¹
Densidad (g/cm ³)	1,09	0,81
Punto de ebullición (°C)	196-225	78
Presión de vapor (Kpa)	0,008	5,726
VOC	0%	Si (100%)
Biodegradable	Si	No
De fuentes Renovables	Si (55%)	No
Inflamable	No	Si
Símbolos de peligrosidad	Ninguno	H225-H319

¹(Carl Roth GmbH, 2024b)

Tabla 12. Comparativa DBE y etanol

En cuanto a la adquisición de los disolventes verdes para las pruebas, el DBE y el carbonato de propileno fueron comprados en C.T.S España S.L. y el D-Limoneno en FactorChem®.

La tríada de disolventes de Cremonesi (Isooctano-acetona-etanol) y sus mezclas fueron suministradas por la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Barcelona.

9.2. Elección de sustancias filmógenas para la preparación de las probetas

Con la finalidad de comprobar la efectividad en la remoción de sustancias filmógenas de características, composición y solubilidad diferentes se realizó una selección de seis sustancias que fueron facilitadas por la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Barcelona.

Las sustancias filmógenas seleccionadas fueron:

- (1) Barniz Dammar Extrafino de la marca Lefranc & Bourgeois.
- (2) Goma Laca al 20% en etanol.
- (3) Paraloid® B-72 al 5% en acetona.
- (4) Regal Varnish Gloss de la marca CTS®.
- (5) Acetato de polivinilo (cola blanca Vinyl pH neutro Dalbe).
- (6) Acril 33 de la marca CTS® sin diluir (puro).

La información técnica y principales características de las sustancias se puede consultar en el Anexo IV.



Imagen 10. Sustancias filmógenas seleccionadas para las probetas

9.3. Preparación de las probetas

La confección de las probetas se llevó a cabo en el aula 110 de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Barcelona, equipada con un extractor. Se prepararon 24 probetas sobre portaobjetos de vidrio, divididas en 4 muestras por cada sustancia filmógena, siendo tres para las pruebas de limpieza y una como control.

Los materiales necesarios para la preparación de las muestras fueron:

- Portaobjetos de vidrio de la marca VWR®.
- Rotulador negro permanente punta fina de la marca Staedtler®.
- Seis pipetas de plástico.
- Caja de madera y caja de cartón contenedoras.
- Hoja de papel para recubrir la caja.
- Hisopos de algodón.
- Etanol.

Antes de aplicar las sustancias, los portaobjetos fueron limpiados con hisopos humedecidos en etanol (Imagen Nº11) y numerados con rotulador negro al igual que las pipetas (Imagen Nº12). Para aplicar las sustancias filmógenas, se utilizó una pipeta específica y otro portaobjetos para distribuir el producto de forma homogénea (Imagen Nº13 y Nº14). Las probetas se secaron durante dos semanas en cajas situando por encima una hoja de papel para evitar el polvo.

Macarena Collazo Inglesini – Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE. Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias filmógenas

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2023-2024

Tras el secado, las muestras fueron bruñidas con lija nº1200 para crear desgaste y mejorar la toma fotográfica con microscopio digital de superficie. Se utilizó luz difusa y luz ultravioleta para capturar las imágenes, siguiendo una plantilla blanca con dos recortes circulares en su interior que ayudó a mantener la consistencia en la toma fotográfica (Imagen Nº17). Finalmente, con un rotulador negro, se marcaron las zonas a limpiar con disolventes del Test de Cremonesi (zona superior) y con los disolventes verdes (zona inferior).



Imagen 11. Limpieza con etanol



Imagen12. Numeración pipetas

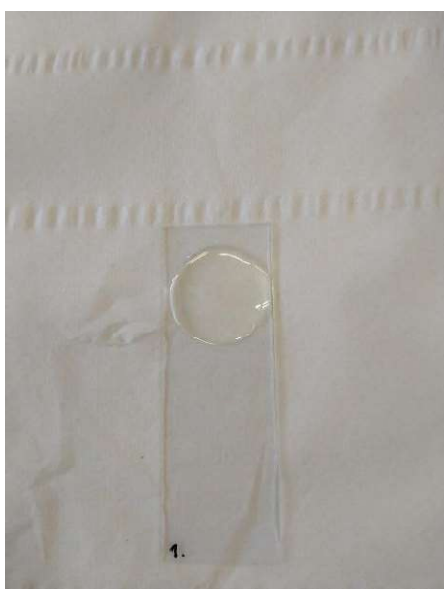


Imagen 13. Aplicación resina dammar

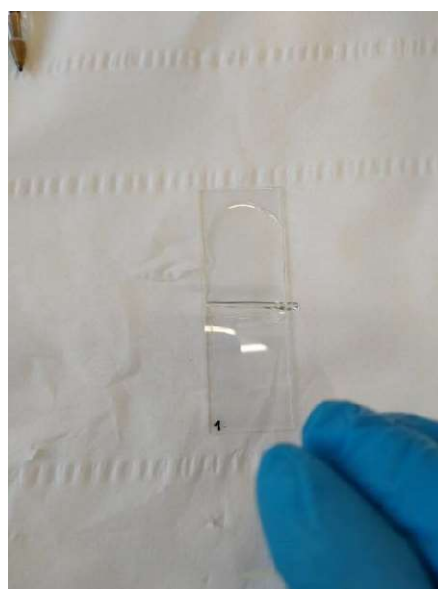


Imagen 14. Distribución homogénea del barniz

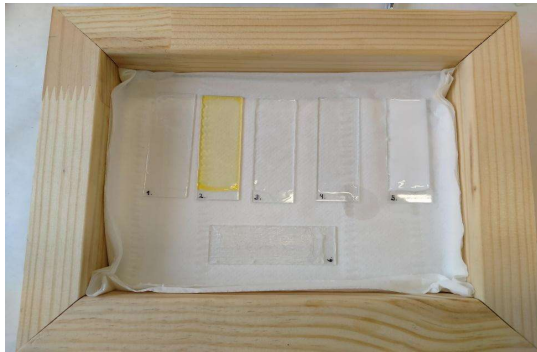


Imagen 15. Probetas de control

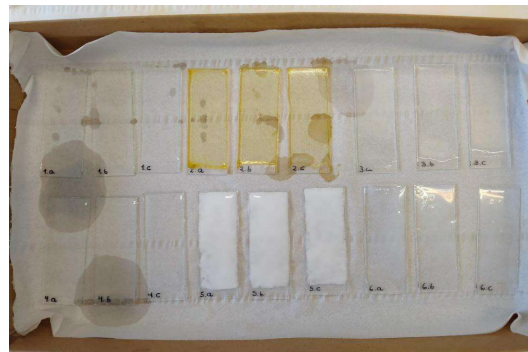


Imagen 16. Probetas para pruebas de limpieza

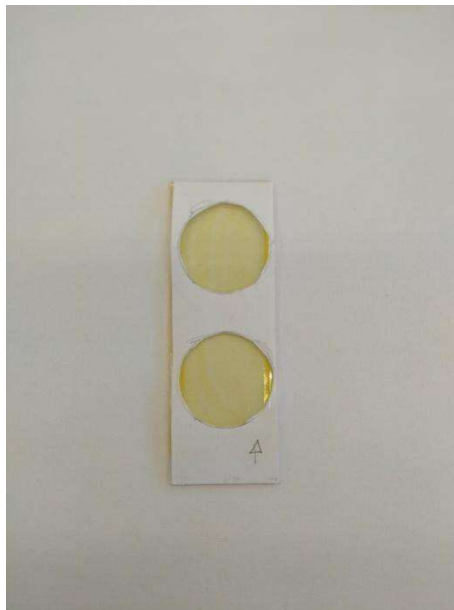


Imagen 17. Plantilla portaobjetos

9.4. Obra original para estudio

Se efectuaron pruebas de limpieza sobre una obra original seleccionada por su antigüedad para poder analizar la remoción de una capa de superficie más envejecida. Como resultado se adquirió una pintura de datación, autoría y materiales desconocidos (Imagen Nº18).

El examen organoléptico permitió determinar que se trata de una pintura sobre tela de dimensión 49,5 x 61 cm. El soporte primario lo constituye la tela y el soporte auxiliar el bastidor. Posee una capa de preparación muy fina aunque no se han podido identificar los componentes que la conforman y una capa pictórica posiblemente realizada al óleo. La capa de superficie es un barniz de naturaleza indeterminada. La superficie presenta una tonalidad amarillenta, posiblemente debido a su oxidación. Dicha tonalidad podría indicar la presencia de un barniz resinoso de naturaleza grasa, compuesto por una resina y un aceite secativo.

Con el propósito de identificar la sustancia filmógena se tomaron dos muestras que se enviaron a analizar: una sin aplicar limpieza y otra luego de retirada la suciedad superficial con una

Macarena Collazo Inglesini – Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE. Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias filmógenas

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2023-2024

solución acuosa. La muestra sobre la que se pudo observar el espectro del barniz fue la segunda y el análisis que permitió determinar su naturaleza fue la espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier⁶ (FTIR). El resultado permitió identificar la existencia de un barniz terpénico, más específicamente una colofonia (Imagen Nº19). La información técnica y principales características de este barniz se mencionan en el Anexo IV.

Finalmente, se tomaron fotografías utilizando la luz difusa y la luz ultravioleta del microscopio digital de superficie. Se preparó una plantilla blanca con siete recortes circulares (tres para disolventes clásicos, tres para los verdes y uno de control) que sirvió de guía para la toma fotográfica (Imagen Nº20).

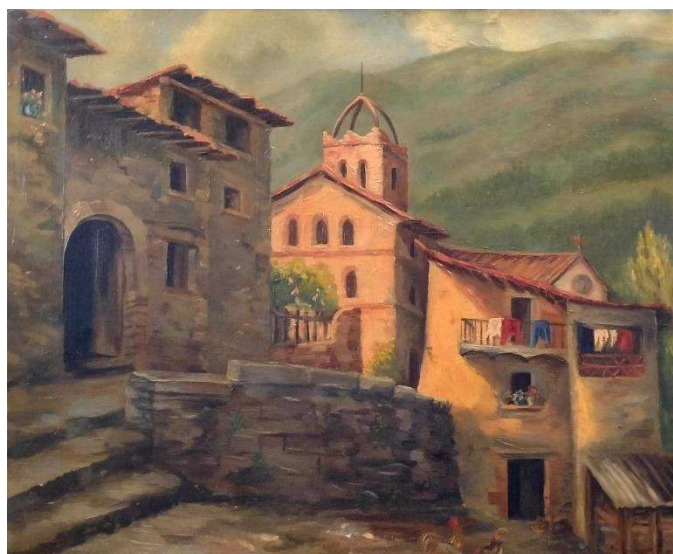


Imagen 18. Obra original: pintura al óleo sobre lienzo

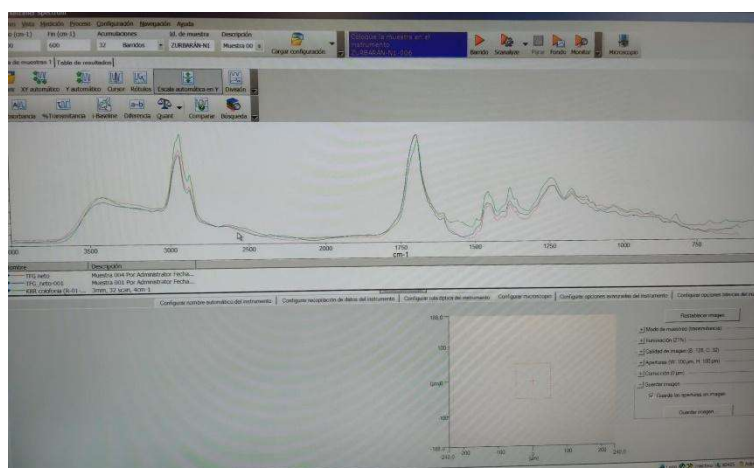


Imagen 19. Espectro del barniz analizado con FTIR

⁶ Análisis realizado en Arte-Lab S.L. de Madrid.

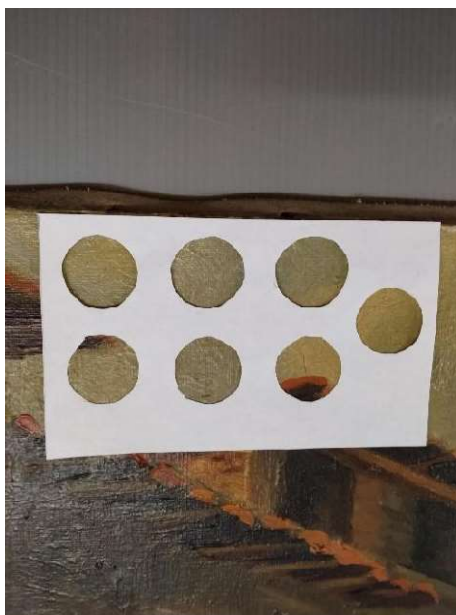


Imagen 20. Plantilla obra original

9.5. Método de aplicación de los disolventes

Se seleccionó como método de aplicación el Evolon® CR. Se trata de un textil no tejido compuesto por microfilamentos (70% poliéster, 30% poliamida; densidad 77,4 g/m²) fabricado por Freudenberg y comercializado por Deffner & Johann (Deffner & Johann, s. f.; Baij et al., 2021). Este material, ampliamente usado en conservación, permite eliminar barnices de pinturas al óleo al limitar la exposición a disolventes y reducir la acción mecánica sobre la superficie tratada. El procedimiento consiste en humedecer el paño con un disolvente seleccionado, colocarlo sobre la sustancia filmógena y solubilizarla. El barniz es adsorbido en los intersticios del material (Baij et al., 2021).

La elección de este material se debió principalmente a:

- La capacidad de retención de los disolventes, permitiendo una descarga controlada. Los disolventes verdes seleccionados no son volátiles, es decir se evaporan lentamente. Esto conlleva el riesgo de una posible penetración o hinchamiento de los estratos subyacentes por lo que no se recomienda su aplicación directa.
- La falta de generación de residuos. No deja pelusas ni residuos como podría ocurrir con la aplicación de un gel que muchas veces requiere la utilización de un papel intermedio (como por ejemplo el papel japonés) o de un aclarado posterior.
- Fácil y rápida aplicación. A diferencia de los gelificados que requieren de mucho tiempo para su elaboración, el Evolon® CR, se aplica directamente y sin ningún tipo de preparación previa.

De la revisión bibliográfica se determinó como tiempo de exposición un período de treinta segundos (30 s). En caso de que la remoción fuese incompleta se volvería de repetir el procedimiento. Finalmente, si se apreciará algún resto, se aplicaría un bastoncillo de algodón seco o apenas humedecido en el disolvente.

Macarena Collazo Inglesini – Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE. Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias filmógenas

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2023-2024

9.6. Descripción de los análisis realizados

Para evaluar la eficacia de los disolventes verdes en la remoción de las sustancias seleccionadas en comparación con los disolventes de la tríada de Cremonesi se hicieron observaciones con luz difusa y con luz ultravioleta utilizando un microscopio digital de superficie de la marca Premier® a 60 aumentos (60x) tomando fotografías antes y después del proceso de limpieza. Para el caso de las probetas preparadas sobre portaobjetos de vidrio, las fotografías se tomaron colocando los portaobjetos sobre una cartulina negra para poder identificar posibles residuos en el vidrio. Con este procedimiento se persiguió poder evaluar la efectividad del proceso de limpieza mediante la identificación en las fotografías iniciales de las marcas del bruñido de las sustancias filmógenas y su ausencia en las fotografías finales.

9.7. Cálculo de los parámetros de solubilidad de los disolventes verdes y sus mezclas

El siguiente paso fue determinar los parámetros de solubilidad de los disolventes verdes seleccionados y sus mezclas. Para su elaboración se tomó como modelo el Test de Cremonesi. Los cálculos de cada mezcla se encuentran detallados en el Anexo V, sin embargo, la tabla resumen se expone a continuación:

Código Mezcla	% Volumen			Parametros de solubilidad		
	D-Limoneno	Carbonato de Propileno	DBE	Fd	Fp	Fh
L	100			74,00	8,00	18,00
LCP1	90	10		71,40	11,00	17,60
LCP2	80	20		68,80	14,00	17,20
LCP3	70	30		66,20	17,00	16,80
LCP4	60	40		63,60	20,00	16,40
LCP5	50	50		61,00	23,00	16,00
LCP6	40	60		58,40	26,00	15,60
LCP7	30	70		55,80	29,00	15,20
LCP8	20	80		53,20	32,00	14,80
LCP9	10	90		50,60	35,00	14,40
CP	100			48,00	38,00	14,00
LD1	90		10	71,90	8,70	19,40
LD2	80		20	69,80	9,40	20,80
LD3	70		30	67,70	10,10	22,20
LD4	60		40	65,60	10,80	23,60
LD5	50		50	63,50	11,50	25,00
LD6	40		60	61,40	12,20	26,40
LD7	30		70	59,30	12,90	27,80
LD8	20		80	57,20	13,60	29,20
LD9	10		90	55,10	14,30	30,60
D			100	53,00	15,00	32,00
CPD1		75	25	49,25	32,25	18,50
CPD2		50	50	50,50	26,50	23,00
CPD3		25	75	51,75	20,75	27,50

Tabla 13. Parámetros de solubilidad de los disolventes verdes seleccionados

9.8. Determinación de los parámetros de solubilidad y pruebas de limpieza

9.8.1. Probetas con sustancias filmógenas

Se realizaron pruebas de limpieza sobre las probetas confeccionadas aplicando hisopos de algodón humedecidos con las diferentes mezclas del test de Cremonesi hasta obtener la más efectiva. Esto permitió posteriormente seleccionar la mezcla de disolventes verdes que coincidiera con la misma zona de solubilidad.

La mezcla del test de Cremonesi más efectiva para cada una de las probetas y su equivalente con disolventes verdes se detalla a continuación:

Ref.	Sustancia filmógena	Test Cremonesi				Disolventes verdes			
		Código	Parámetros de solubilidad			Código	Parámetros de solubilidad		
		Mezcla	Fd	Fp	Fh	Mezcla	Fd	Fp	Fh
1	Barniz Dammar	I	100			*			
2	Goma laca	IA8	58	25	17	D	53	15	32
3	Paraloid® B-72	IA7	63	22	15	LCP4	64	20	16
4	Regal Varnish Gloss	IA1	95	3	2	*			
5	Acetato de polivinilo	**				**			
6	Acril 33	IA8	58	25	17	LCP6	58	26	16

Tabla 14. Parámetros de solubilidad de las sustancias filmógenas

En la tabla Nº14 los “códigos de mezcla” marcados con un asterisco (*) indican que no hay disolvente o mezcla de disolventes verdes que coincidan con los mismos parámetros del Test de Cremonesi por existir la limitación de poseer un área de solubilidad menor. A pesar de ello, se aplicó para el Barniz Dammar y el Regal Varnish Gloss, el disolvente D-Limoneno puro por presentar los parámetros más cercanos.

Para el acetato de polivinilo, marcado con dos asteriscos (**), ninguna de las mezclas del test de Cremonesi permitió solubilizar la sustancia posiblemente por presentar una polaridad muy alta. Consecuentemente, estas probetas fueron descartadas por no cumplir con el objetivo de realizar pruebas de limpieza con ambas tríadas.

Del resto de sustancias, se observó que las mezclas de disolventes verdes que igualaban los parámetros obtenidos con el Test de Cremonesi solo permitían probar el D-Limoneno y el Carbonato de propileno, quedando fuera de las pruebas el DBE. Para poder realizar ensayos con este disolvente, se decidió aplicar el DBE puro en la remoción de la goma laca. La elección de esta sustancia obedeció a razones de solubilidad. La goma laca es soluble en etanol y el DBE se plantea como su alternativa verde en este trabajo.

De esta manera la tabla definitiva de limpieza se expone a continuación:

Ref.	Sustancia filmógena	Test Cremonesi				Disolventes verdes			
		Código	Parámetros de solubilidad			Código	Parámetros de solubilidad		
		Mezcla	Fd	Fp	Fh	Mezcla	Fd	Fp	Fh
1	Barniz Dammar	I	100			L	74	8	18
2	Goma laca	IA8	58	25	17	D	53	15	32
3	Paraloid® B-72	IA7	63	22	15	LCP4	64	20	16
4	Regal Varnish Gloss	IA1	95	3	2	L	74	8	18
6	Acril 33	IA8	58	25	17	LCP6	58	26	16

Tabla 15. Mezclas utilizadas en el proceso de limpieza

Finalmente, se procedió a la eliminación efectiva de las sustancias filmógenas. Para facilitar la tarea se utilizó Evolon® CR aplicado durante 30 s y un hisopo de algodón seco o apenas humedecido para lograr la eliminación completa.



Imagen 21. Aplicación Evolon®CR con Test Cremonesi

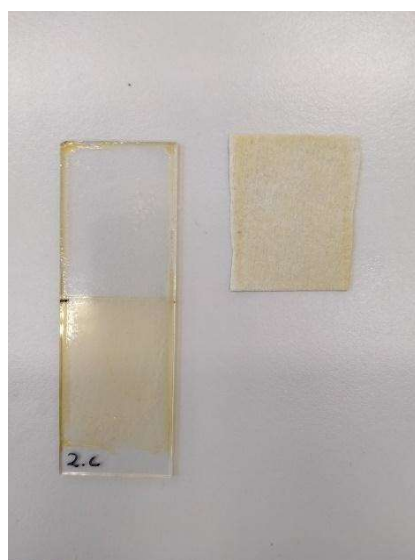


Imagen 22. Retirada de Evolon®CR

9.8.2. Obra original

Se realizaron pruebas de limpieza aplicando hisopos de algodón humedecidos con las diferentes mezclas del test de Cremonesi hasta obtener la más efectiva. Esto permitió posteriormente seleccionar la mezcla de disolventes verdes que coincidiera con la misma zona de solubilidad.



Imagen 23. Test de Cremonesi sobre obra original

Los resultados de la prueba de limpieza se detallan a continuación:

Sustancia filmógena	Test Cremonesi				Disolventes verdes			
	Código	Parámetros de solubilidad			Código	Parámetros de solubilidad		
	Mezcla	Fd	Fp	Fh	Mezcla	Fd	Fp	Fh
Colofonia (obra original)	IA7	63	22	15	LCP4	64	20	16

Tabla 16. Mezclas utilizadas sobre la obra original

Posteriormente, se procedió a la eliminación efectiva del barniz de colofonia. También se utilizó Evolon® CR aplicado durante 30 s e hisopos de algodón secos o apenas humedecidos para lograr la eliminación completa.



Imagen 24. Aplicación Evolon® CR con mezcla verde

Adicionalmente a la prueba de limpieza anteriormente mencionada se hizo un nuevo ensayo testeando los disolventes verdes en su estado puro para comprobar su efectividad sin mezclar tal como en el estudio de Macchia (Macchia et al., 2021)

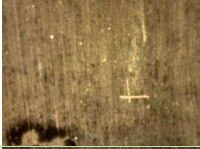


Imagen 25. Prueba de disolventes verdes puros sobre obra original

9.9. Resultados

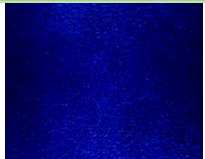
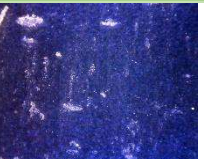
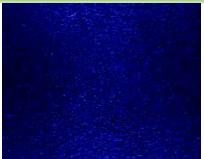
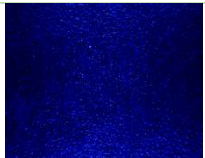
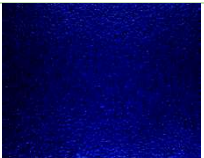
9.9.1. Probetas con sustancias filmógenas

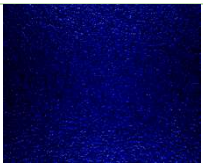
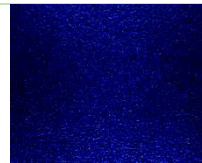
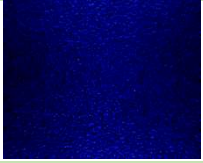
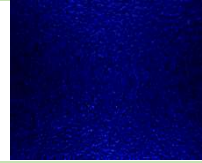
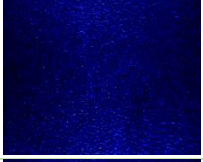
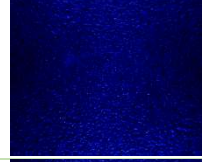
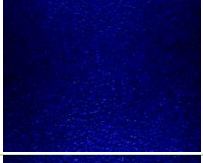
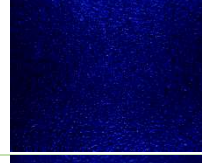
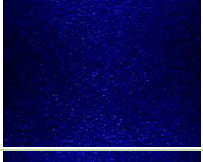
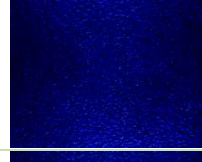
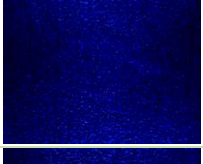
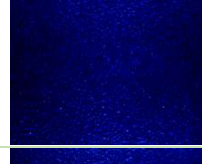
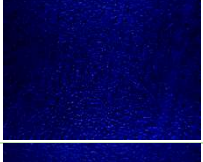
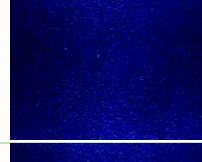
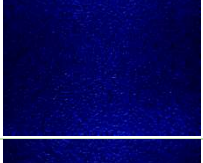
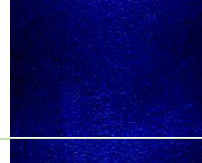
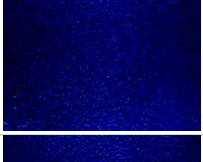
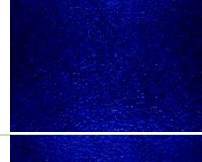
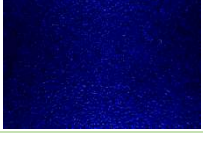
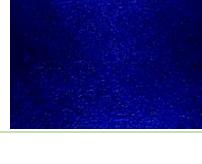
El análisis de los resultados se realizó con el microscopio digital de superficie Premier®, a 60 aumentos (60x). Se tomaron fotografías iniciales y finales de las probetas con luz difusa y luz ultravioleta utilizando una cartulina negra de fondo para visualizar mejor la eliminación de las sustancias.

	Ref.	Antes de la limpieza con Test Cremonesi	Después de la limpieza con Test Cremonesi	Antes de la limpieza con disolventes verdes	Después de la limpieza con disolventes verdes
D A M M A R	1.a				
	1.b				
	1.c				
G O M A L A C A	2.a				
	2.b				
	2.c				
P A R A L O I D	3.a				
	3.b				
	3.c				

R E G A L	4.a				
	4.b				
	4.c				
A C R I L	6.a				
	6.b				
	6.c				

Tabla 17. Comparativa antes y después de la limpieza analizada con microscopio digital de superficie Premier®, a 60x, luz difusa.

Ref.	Antes de la limpieza con Test Cremonesi	Después de la limpieza con Test Cremonesi	Antes de la limpieza con disolventes verdes	Después de la limpieza con disolventes verdes
D A M M A R	1.a			
	1.b			

G O M A L A C A	1.c				
	2.a				
	2.b				
	2.c				
	3.a				
	3.b				
	3.c				
	4.a				
	4.b				
	4.c				

Macarena Collazo Inglesini – Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE. Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias filmógenas
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, curs 2023-2024

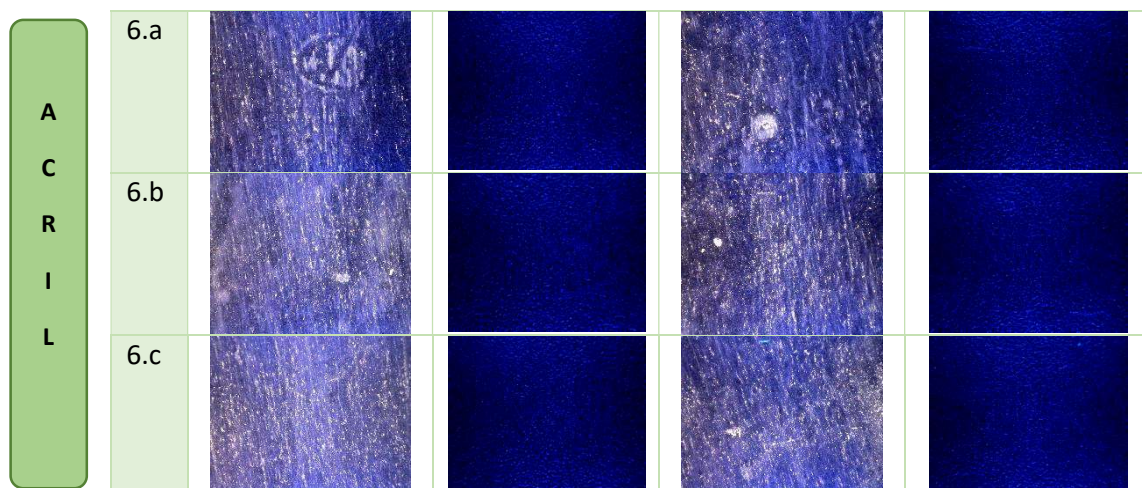


Tabla 18. Comparativa antes y después de la limpieza analizada con microscopio digital de superficie Premier®, a 60x, luz ultravioleta.

Las sustancias seleccionadas pudieron removerse en mayor o menor medida con ambas tipologías de disolventes como se expone en la siguiente tabla:

Ref.	Sustancia filmógena	Test Cremonesi		Disolventes verdes	
		Código	Solubiliza	Código	Solubiliza
1	Barniz Dammar	I	Si	L	Si
2	Goma laca	IA8	Si	D	Si
3	Paraloid® B-72	IA7	Si	LCP4	Si
4	Regal Varnish Gloss	IA1	Si	L	Si
6	Acril 33	IA8	Si	LCP6	Si

Tabla 19. Resultados de la limpieza

El Barniz Dammar, que en las pruebas de limpieza con el Test de Cremonesi fue solubilizado por el isooctano puro (I), caracterizado por su apolaridad debido a su reciente aplicación y falta de envejecimiento, también fue removido sin inconvenientes por el D-Limoneno puro (L), a pesar de no tener los mismos parámetros de solubilidad. Lo mismo ocurrió con el Regal Varnish Gloss, que fue removido por el disolvente verde. Sin embargo, las fotografías de la superficie de los vidrios en donde se aplicó Regal Varnish Gloss (4.a, 4.b y 4.c) y donde se utilizó el D-Limoneno como disolvente, presentan zonas más opacas y ligeras marcas, posiblemente por residuos tras una limpieza incorrecta.

La remoción del Paraloid®B-72 al 5% en acetona también fue muy efectiva con la mezcla de disolventes verdes propuestos (LCP4): 60% de D-Limoneno y 40% de Carbonato de Propileno. En relación a los disolventes del Test de Cremonesi todas las imágenes mostraron la correcta eliminación del Paraloid® B-72 salvo las imágenes con luz difusa y luz UV de la muestra 3.c. En ellas se visualizan unas ligeras rayas verticales. Se presume que hubo un fallo durante el procedimiento de limpieza ya que en las muestras 3.a y 3.b no se observan estas marcas.

Respecto a la remoción de la goma laca al 20% en etanol, a pesar de no utilizar la mezcla que más se asemejaba a los parámetros de solubilidad del Test de Cremonesi, el uso del DBE demostró ser muy efectivo para su remoción. Las imágenes tomadas con el microscopio digital de superficie permitieron confirmar su correcta eliminación.

En el caso del Acril 33, la mezcla verde (LCP6): 40% D-Limoneno y 60% Carbonato de propileno, permitió su remoción, aunque fue más laboriosa, requiriendo una limpieza mecánica con varios hisopos humedecidos. Finalmente, las imágenes confirmaron su correcta eliminación.

9.9.2. Obra original

El análisis de los resultados se realizó con el microscopio digital de superficie Premier®, a 60 aumentos (60x) comparando las fotografías iniciales y finales de la obra original con luz difusa y luz ultravioleta.

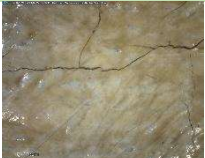
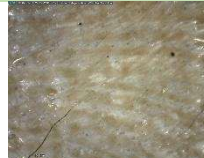
	Ref.	Antes de la limpieza con Test Cremonesi	Después de la limpieza con Test Cremonesi	Antes de la limpieza con disolventes verdes	Después de la limpieza con disolventes verdes
C O L O F O N I A	7.a				
	7.b				
	7.c				

Tabla 20. Comparativa antes y después de la limpieza analizada con microscopio digital de superficie Premier®, a 60x, luz difusa.

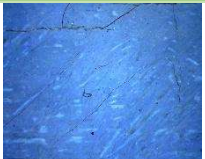
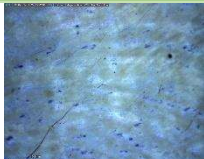
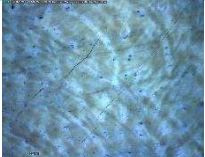
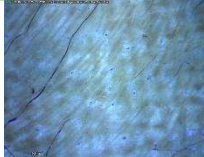
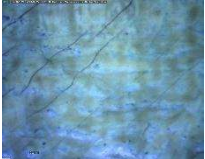
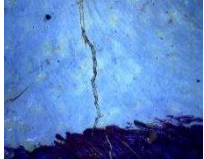
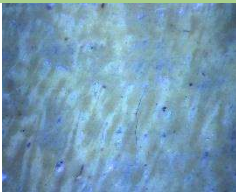
C O L O F O N I A	Ref.	Antes de la limpieza con Test Cremonesi	Después de la limpieza con Test Cremonesi	Antes de la limpieza con disolventes verdes	Después de la limpieza con disolventes verdes
	7.a				
	7.b				
	7.c				

Tabla 21. Comparativa antes y después de la limpieza analizada con microscopio digital de superficie Premier®, a 60x, luz ultravioleta.

La eliminación del barniz de colofonia con la mezcla verde (LCP4): 60% D-Limoneno y 40% Carbonato de Propileno, también fue más complicada que con la mezcla de Cremonesi. Este hecho se evidenció ya que en la mezcla verde se necesitó realizar más pasadas con el hisopo. Adicionalmente, las fotografías finales confirmaron la presencia de restos de barniz de colofonia en la zona tratada con disolventes verdes.

Como se mencionó en el punto 10.8.2, los disolventes verdes puros se probaron también directamente sobre la obra original, al igual que en el estudio de Macchia et al. con el fin de analizar su efectividad en la remoción del barniz de colofonia. Los resultados se plasmaron en la siguiente tabla:

Disolvente Verde	Luz difusa	Luz ultravioleta	Solubiliza
D-Limoneno			No
Carbonato de Propileno			Si

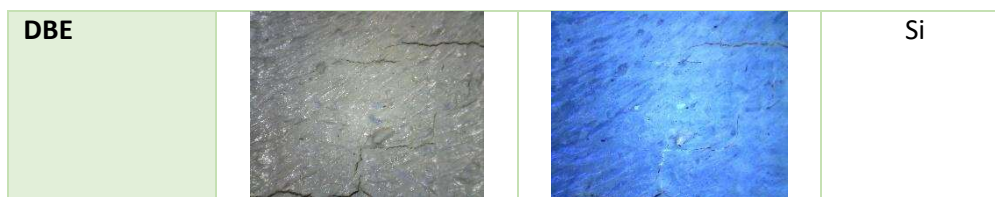


Tabla 22. Resultados de la limpieza con disolventes verdes puros

El disolvente D-Limoneno no fue eficaz en la remoción del barniz de colofonia como se pudo observar a visu (Imagen Nº25) y en las fotografías tomadas con el microscopio digital de superficie. La película de barniz quedó prácticamente intacta.

La utilización del Carbonato de propileno permitió la remoción del barniz de colofonia, pero no al 100%. En la imagen con luz ultravioleta se visualiza la presencia de restos de barniz identificados como pequeños puntos de color amarillo.

Por último, el DBE se presentó como la mejor opción para la remoción efectiva de la colofonia envejecida.

Plasmar estos resultados sin hacer mención del Evolon® CR sería un error ya que contribuyó, en gran medida, al logro de los mismos. Este material permitió remover las sustancias de una manera rápida y eficaz siendo recomendable su uso. Se observaron importantes beneficios: una aplicación rápida, la ausencia de residuos al no dejar pelusas y una aplicación controlada que evita riesgos para la obra. A su vez, la utilización del Evolon® CR con los disolventes del Test de Cremonesi sirvió para evitar la rápida evaporación de estos compuestos volátiles, optimizando las cantidades de disolventes utilizados. Además, con los disolventes verdes, caracterizados por tener una evaporación muy lenta, permitió evitar problemas como la disolución de los materiales originales de la obra real o posibles problemas de hinchamiento o lixiviación de los estratos subyacentes.

9.10. Discusión de resultados

Del examen organoléptico, de las observaciones realizadas durante el proceso de limpieza y de las imágenes obtenidas con el microscopio digital de superficie se obtuvieron resultados que se pueden relacionar con los estudios e investigaciones consultadas.

Como punto de partida, se destaca la ausencia de investigaciones previas que utilicen los tres disolventes verdes propuestos en este trabajo de manera conjunta, ni tampoco que se planteen como alternativa directa al Test de Cremonesi. Sin embargo, existe un antecedente relevante: el trabajo *Green solvents and restoration: Application of biomass-derived solvents in cleaning procedures* (Melchiorre et al., 2023), donde se exploran alternativas sostenibles para la limpieza de obras de arte mediante una tríada de disolventes verdes (solketal, γ -valerolactona y Pelargonato de 2-etilhexilo). Pese a las similitudes en el enfoque, se observa que la zona de acción de dicha tríada es más limitada que la del Test de Cremonesi, una limitación compartida con la propuesta de este estudio. No obstante, el artículo de Melchiorre et al. resultó clave en el diseño metodológico de este trabajo, sirviendo de inspiración para el uso de probetas con sustancias filmógenas sobre portaobjetos y para la realización de mezclas experimentales aplicadas en una obra real.

En relación a los métodos de medición, tanto en el estudio de Melchiorre et al. como en el presente trabajo se tomaron fotografías visibles y con fluorescencia UV. Sin embargo, en el primer caso también se realizó un análisis termogravimétrico para evaluar la velocidad de evaporación de los disolventes.

Una diferencia notable en el método de limpieza fue la forma de aplicar los disolventes: Melchiorre et al. optaron por depositar gotas sobre los portaobjetos, retirándolas con hisopos secos para evitar la fricción mecánica. Por el contrario, en el presente trabajo se utilizó Evolon®CR junto con hisopos secos o ligeramente humedecidos.

Los resultados obtenidos por Melchiorre et al. evidenciaron que una de las mezclas de disolventes clásicos logró una solubilización parcial del barniz sin llegar a su eliminación completa. Este fenómeno se atribuyó a la rápida evaporación de los disolventes clásicos, que impide un tiempo de acción suficiente. Este problema podría haberse solventado con el uso de Evolon®CR o de un gelificante, lo cual refuerza la importancia del método de aplicación. En el estudio *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021) se usaron hisopos de algodón para la remoción de sustancias filmógenas, mientras que, en la información disponible sobre el DBE y el carbonato de propileno (CTS®, s.f.-b), se sugiere su empleo en forma de gel. Un caso en donde este aspecto se tuvo en cuenta fue en el estudio *The Green Attitude in Art Conservation: Polyhydroxybutyrate-based Gels for the Cleaning of Oil Paintings* (Samorì et al., 2016), donde se aplicaron organogeles basados en poli-3-hidroxibutirato (PHB) e γ -valerolactona para eliminar películas protectoras envejecidas de la superficie de pinturas con resultados exitosos.

Entre los disolventes verdes evaluados, el DBE destacó como el más eficaz. En la fase experimental, se observó que este compuesto logró una limpieza eficiente de diversas sustancias filmógenas, un hallazgo respaldado por el estudio *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021), donde el DBE mostró un buen poder solvente y una baja presencia de residuos tras la limpieza, confirmada mediante espectroscopia infrarroja (FTIR). En este contexto, el DBE se posiciona como una alternativa verde viable al etanol, al cubrir parámetros de solubilidad similares, como se muestra en la Tabla Nº4 del presente trabajo. Adicionalmente, se verificó que no es estrictamente necesario replicar los parámetros exactos del Test de Cremonesi para obtener buenos resultados, ya que el DBE permitió la remoción de goma laca al 20% en etanol gracias a su capacidad de actuar dentro de un área de solubilidad más amplia y no de puntos en concreto (Saera, 2008). Según la bibliografía consultada, en el artículo *Sistemas para la eliminación o reducción de barnices. Estudio de residuos. Protocolos de actuación* (Ledesma et al., 2006), los valores Fd de la goma laca se encuentran entre 30 y 54, mientras que el DBE posee un valor Fd de 53, situándose dentro de esta zona de solubilidad. La zona de solubilidad de la goma laca se puede observar en la imagen obtenida con el software utilizado para hacer todos los gráficos (Coladonato & Scarpitti, 2022) en el Anexo VI.

El carbonato de propileno presentó resultados aceptables tanto en pruebas individuales como en mezclas. En el artículo *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021), se menciona que este disolvente deja más residuos que el DBE en todos los productos testeados. Parece importante indicar que en esta investigación, además de los disolventes verdes se hicieron pruebas con dos disolventes clásicos como la

acetona y el MEK. De la comparativa entre la acetona y el carbonato de propileno (propuesto en este trabajo como su alternativa verde), surge que el nivel de residuos que dejan ambos disolventes es prácticamente igual para la resina dammar, el barniz de retoque y el Paraloid® B-72. Sin embargo, para el PVA la acetona deja menos residuos.

Por otro lado, la valoración global respecto a la eficacia en la eliminación de las sustancias filmógenas, sitúa al carbonato de propileno como el disolvente menos eficaz, bastante por debajo de los resultados obtenidos con la acetona y el resto de los disolventes verdes (Tabla Nº6).

Este dato se podría relacionar con el resultado de las pruebas de limpieza con disolventes puros en la obra original donde el carbonato de propileno no fue 100% efectivo en la remoción del barniz a diferencia del DBE.

El D-Limoneno, por su parte, fue eficaz en la remoción de barnices como el Dammar y el Regal Varnish Gloss aplicados en las probetas de vidrio, lo cual se explica ya que las áreas de solubilidad de estas sustancias que no se limitan a un único punto. Según el artículo *Sistemas para la eliminación o reducción de barnices. Estudio de residuos. Protocolos de actuación* (Ledesma et al., 2006), los valores Fd de la resina dammar de reciente aplicación se encuentran entre 54 y 90, y el D-Limoneno, con un valor Fd de 74, actúa dentro de esta zona. La zona de solubilidad de la resina dammar se puede observar en la imagen obtenida con el software utilizado para hacer todos los gráficos (Coladonato & Scarpitti, 2022) en el Anexo VI.

Sin embargo, su eficacia disminuyó con barnices envejecidos, como la colofonia, donde fue necesario emplear disolventes de mayor polaridad o combinaciones como D-Limoneno y carbonato de propileno (LCP4).

Los análisis con mezclas de disolventes verdes y clásicos revelaron diferencias significativas en la remoción de barnices, incluso cuando se igualaron los parámetros de solubilidad. Las pruebas en la obra original mostraron que, pese a los parámetros similares, las mezclas de Cremonesi lograron mejores resultados que los disolventes verdes en ciertas áreas. En el libro *La química en la restauración: los materiales del arte pictórico* (Matteini, 2001) se explica este hecho por varios motivos. El primero es el concepto de “poder del disolvente” que establece tres factores determinantes: el grado de apolaridad de la molécula, el grado de polaridad y la propensión a formar enlaces por puentes de hidrógeno. Otras propiedades de los disolventes que también se deben tener en consideración en el caso de las mezclas son: la volatilidad, la retención, la tensión superficial, etc. De estas propiedades dependerá que cada mezcla presente unas características diferentes. Es decir, no basta con utilizar parámetros de solubilidad semejantes, sino que se debe tener en cuenta las propiedades particulares de cada mezcla en relación a la volatilidad, la retención y la tensión superficial.

Finalmente, se observó que las probetas tratadas con D-Limoneno mostraron zonas más opacas y ligeras marcas, posiblemente debido a residuos de las sustancias filmógenas. Aunque no se encontraron fuentes bibliográficas específicas para corroborar este hecho, en el estudio *Towards sustainable museum conservation practices: A study on the Surface cleaning of contemporary art and design objects with the use of biodegradable agents* (Kampasakali et al., 2021) sugieren que variaciones de brillo en superficies tratadas con D-Limoneno podrían atribuirse a limpiezas inadecuadas más que a las propiedades intrínsecas del disolvente. Este

aspecto subraya la necesidad de optimizar los métodos de aplicación para maximizar la efectividad de los disolventes verdes.

10. Conclusiones generales

A través de la investigación bibliográfica, se lograron los objetivos específicos iniciales: identificar los disolventes verdes más utilizados en procesos de limpieza de obras de arte policromadas e investigar sus características, ventajas y desventajas, consolidando esta información en una tabla comparativa. Asimismo, el análisis permitió obtener conclusiones complementarias de gran relevancia.

En primer lugar, se constató la notable falta de información específica sobre el tema, así como disparidades significativas entre las diversas fuentes consultadas. Esto dificultó la comparación de datos y el análisis crítico. Las diferencias más evidentes se hallaron respecto a la presencia de VOC, criterios de peligrosidad y toxicidad evidenciadas en artículos científicos, normativas y fichas de seguridad de diferentes laboratorios.

Por ejemplo, en el caso del 1,3-Dioxolano, mientras algunas fuentes como la Universidad de Guanajuato lo clasifican como no tóxico y con baja formación de peróxidos, otras, como Thermo Fisher Scientific y Cameo Chemicals, indican un VLA muy bajo de 20 y reportan estudios en curso sobre posible feto-toxicidad. Estas inconsistencias dificultan su evaluación y subrayan la necesidad de criterios estandarizados.

Otro ejemplo de la diversidad de enfoques es el empleo del término "verde". Algunos disolventes denominados así, como el Solketal, TOU y el propio 1,3-Dioxolano, están bajo investigación por posible toxicidad. Esto sugiere un uso poco riguroso del término que, si bien apunta hacia un enfoque más sostenible, puede generar falsas expectativas. Es evidente que, aunque los disolventes verdes representan un avance respecto a los tradicionales, no están exentos de riesgos.

Frente a estas inconsistencias, es crucial contar con fichas de seguridad actualizadas, pues nuevas investigaciones pueden reclasificar productos previamente considerados seguros. Además, se recomienda extremar precauciones, empleando EPIs adecuados y sistemas de ventilación como campanas extractoras, especialmente para disolventes más volátiles.

La fase experimental permitió evaluar la eficacia de disolventes seleccionados según criterios de sostenibilidad como biodegradabilidad, baja toxicidad, ausencia de pictogramas de peligrosidad, procedencia renovable y características técnicas favorables. Aunque ninguno cumple plenamente con todos los principios de la química verde, el DBE destaca como una opción prometedora por combinar propiedades ventajosas con buenos resultados en las pruebas de limpieza.

Si bien la triada verde aplicada abarca un área de solubilidad menor que la triada de Cremonesi, en muchos casos mostró resultados similares en la remoción de sustancias filmógenas. Esto se debe a que todas las sustancias presentan un área o zona de solubilidad que no se limita a un solo punto dentro del diagrama ternario. El envejecimiento de las sustancias es otro factor a tener en cuenta para determinar el mejor disolvente o mezcla de disolventes a utilizar. La remoción de barniz de colofonia, por ejemplo, reveló que, además de los parámetros de solubilidad, es necesario considerar propiedades como volatilidad, retención y tensión superficial.

Desde una perspectiva global, los disolventes verdes ofrecen un enfoque más respetuoso con la salud, el medio ambiente y las obras de arte. No obstante, su baja volatilidad exige métodos de aplicación controlados para evitar problemas como la retención en capas subyacentes, hinchamiento o lixiviación. Este desafío técnico podría abordarse mediante pruebas con geles, organogeles o textiles especializados como Evolon®CR, lo que abre nuevas posibilidades de investigación.

Además, se identificaron áreas potenciales para futuros estudios: análisis termogravimétricos para evaluar la velocidad de evaporación, estudios de colorimetría para detectar alteraciones en las capas subyacentes, análisis de brillo para examinar el impacto en el índice de refracción y espectroscopias de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) para identificar residuos tras la limpieza. Estas herramientas podrían mejorar la comprensión del comportamiento de los disolventes verdes en los procesos de limpieza.

Otra línea de investigación podría centrarse en ampliar el análisis hacia otros tipos de barnices y resinas, tanto naturales como sintéticas, considerando no solo la eficacia en la remoción, sino también su impacto en las capas pictóricas. Asimismo, sería pertinente explorar la aplicación de disolventes verdes en materiales inorgánicos, extendiendo su utilidad más allá de las obras policromadas.

Aunque los disolventes verdes representan una evolución frente a los tradicionales, aún queda mucho por desarrollar en este campo. Es un área de interés creciente, pero con avances todavía limitados. La comunidad de conservadores-restauradores desempeña un papel clave en fomentar la investigación y en adoptar prácticas más sostenibles basadas en un enfoque crítico y científico.

En conclusión, el camino hacia la sostenibilidad en la conservación y restauración es largo, pero esencial. La implementación de productos más respetuosos con el medio ambiente, las personas y las obras de arte requiere tanto compromiso como rigurosidad técnica. Solo a través de una investigación continua y la colaboración activa entre profesionales se podrán superar los desafíos y consolidar prácticas realmente sostenibles y eficaces.

11. Bibliografia

- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University PressOxford. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198506980.001.0001>
- Art Kiosco. (s. f.). *Cola blanca Vinyl pH neutro 500 MG. Dalbe*. Recuperado 13 de abril de 2024, de <https://artkiosko.es/colas-y-pegamentos/cola-blanca-vinyl-ph-neutro-500-mg-dalbe.html>
- Baij, L., Liu, C., Buijs, J., Alvarez Martin, A., Westert, D., Raven, L., Geels, N., Noble, P., Sprakel, J., & Keune, K. (2021). Understanding and optimizing Evolon® CR for varnish removal from oil paintings. *Heritage Science*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00627-9>
- Barin. (2022). *Clasificación de sustancias CRM*. Recuperado 6 de mayo de 2024, de <https://www.barin.es/actualidad/2022/clasificacion-sustancias-crm/>
- Barros García, J. M. (2005). *Imágenes y sedimentos: la limpieza en la conservación del patrimonio pictórico* [Book]. Institució Alfons El Magnànim-Diputació de València.
- Bestetti, R. (2020). *La verniciatura dei manufatti policromi : dalle vernici tradizionali alle resine a basso peso molecolare* [Book]. Il prato.
- Borgioli, Leonardo. (2005). *Le Resine sintetiche usate nel trattamento di opere policrome* (Paolo. Cremonesi, Ed.) [Book]. Il Prato.
- Çakmak, Y., Çakmakçi, E., Apohan, N. K., & Karadag, R. (2022). Isosorbide, pyrogallol, and limonene-containing thiol-ene photocured bio-based organogels for the cleaning of artworks. *Journal of Cultural Heritage*, 55, 391-398. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.04.013>
- Cameo Chemicals. (s. f.-a). *Dioxolane*. Recuperado 29 de abril de 2024, de <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/618>
- Cameo Chemicals. (s. f.-b). *D-Limonene*. Recuperado 31 de marzo de 2024, de <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/20568#section1>
- Capacitación industrial. (s. f.). *¿Qué es la dosis letal media (LD50) y como se calcula?* Recuperado 28 de abril de 2024, de <https://www.capcot.com.mx/blogs/qu%C3%A9-es-la-dosis-letal-media-ld50-y-como-se-calcula>
- Carl Roth GmbH. (2024a). *Ficha de seguridad Acetona*. Recuperado 29 de mayo de 2024, de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-CP40-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyOTIxMzV8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFVXkdMMmc0Wxk4NU1UUUXINVEkyTIRFd01URXdMMU5FUWw5RFVEUXdYMFZUWDBWVExuQmtaZ3w2YzI3M2M2NGY0YjhlOWY1YmNmOGY4NjA1NTY2OWE0MTEwZDA0YzEwOTdjOWZhNDE4MjY3Yzc4ZjNmOWNhZTQ1>

- Carl Roth GmbH.** (2024b). *Ficha de seguridad Etanol*. Recuperado 29 de mayo de 2024, de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-T171-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGFOYXNoZWV0c3wyOTgzOTV8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFEEQTVMMmczWXk4NU1UUTVNemt6TVRBNU1ESXIMMU5FUWw5VU1UY3hYMFZUWDBWVExuQmtaZ3wzNmM3MTRiODA3MGZmN2EzNjJlN2RjZTY0NzZkMjRkMTM0YWQ2N2ZlOGFmN2Y1ODBiMTA5NDA4OTY3OGI4ZjVkJV>
- Carl Roth GmbH.** (2024c). *Ficha de seguridad Ethylal*. Recuperado 29 de abril de 2024, de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-0787-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGFOYXNoZWV0c3wyNzI2MDR8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFHSXIMMmhtWIM4NU1UUXpNalk1TkRrd056RTRMMU5FUWw4d056ZzNYMFZUWDBWVExuQmtaZ3w4YmU5MTAzMWZkNjhkZGQ3ZDU0OWUxNDJjZTAxMzdkY2QzMTCyM2JkNzY1ZmRkNTNjZTE2Njc1MzUzZDU0MWU5>
- Carl Roth GmbH.** (2024d). *Ethylal, 1 l*. Recuperado 1 de mayo de 2024, de <https://www.carlroth.com/com/en/acetals/ethylal/p/0787.3>
- Carl Roth GmbH.** (2024e). *Ficha de seguridad Isoooctano*. Recuperado 29 de mayo de 2024, de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-6889-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGFOYXNoZWV0c3wzMTcxMDR8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFEEQXhMMmcwTnk4NU1UUTJNemN6T1RrMk5UYzBMMU5FUWw4Mk9EzZVYMFZUWDBWVExuQmtaZ3xhZjJwNmlyNWU4NmVlZmU4ZDVjZjA3Nzc2MTcyZWlZODA1NDhjMTA2MTFmOWlyODg0ZDI4YmE5NzhiNTc2OGQ1>
- Carl Roth GmbH. (2024f).** *Tetraoxaundecane, 1 l*. Recuperado 14 de abril de 2024, de <https://www.carlroth.com/en/en/alternative-solvents/tetraoxaundecane/p/0786.3>
- Carl Roth GmbH. (2024g).** *Ficha de seguridad TOU*. Recuperado 29 de abril de 2024, de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-0786-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGFOYXNoZWV0c3wyNDQ2NDN8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFEEUmhMMmhtWWk4NU1UUXpNalk1TXpreU5ERTBMMU5FUWw4d056ZzJYMFZUWDBWVExuQmtaZ3xkMTQ2NDJhN2JmZTQ3MGUxMGJjYjJkNzRkNTQxZTZlZmZmNGEzN2ZlMTc5MzgZmZlY0M2JhYmVIN2FhOGZlMjky>
- Carson, R.** (1962). *Primavera silenciosa*.
- Casini, A., Chelazzi, D., & Baglioni, P.** (2023). Advanced methodologies for the cleaning of works of art. *Science China Technological Sciences*, 66(8), 2162-2182. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2348-7>
- Chemical Book.** (2023). *Diethoxymethane*. Recuperado 29 de abril de 2024, de https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB4128049.htm

- Chemical Safety.** (2021). *Hoja de referencia del Sistema Globalmente Armonizado (GHS)*. Recuperado 14 de abril de 2024, de <https://chemicalsafety.com/es/hoja-de-referencia-del-sistema-globalmente-armonizado-ghs/>
- Chemwatch.** (s. f.). *Nivel Sin Efecto Derivado (DNEL)*. Recuperado 28 de abril de 2024, de <https://chemwatch.net/es/resource-center/derived-no-effect-level-dnel/>
- Coladonato, M., & Scarpitti, P.** (2022). *Triangolo interattivo dei solventi e solubilità (TRISOLV V.5.5)* (5.5). Recuperado 31 de marzo de 2024, de <http://www.icr.beniculturali.it/pagina.cfm?umn=297&uid=505&usz=1>
- Consejo de la Unión Europea.** (1999). *Directiva 1999/13/CE*. Recuperado 29 de abril de 2024, de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1999-80534>
- Cremonesi, Paolo.** (2000). *L'Uso dei solventi organici nella pulitura di opere policrome* [Book]. Il prato.
- CTS®.** (s. f.-a). *49.1 Nuevos productos - DECK 4000: La pareja Dioxolano y Metilal*. Recuperado 6 de mayo de 2024, de <https://shop-espana.ctseurope.com/1120-1-nuevos-productos-deck-4000-la-pareja-dioxolano-y-metilal>
- CTS®.** (s. f.-b). *Disolventes de baja toxicidad y bajo impacto ambiental*. Recuperado 3 de marzo de 2024, de <https://shop-espana.ctseurope.com/documentacioncts/fichastecnicasweb2018/3.1disolventes2016/NUEVOS%20DISOLVENTES%20DE%20BAJA%20TOXICIDAD.pdf>
- CTS®.** (2013). *Paraloid® B-72*. Recuperado 13 de abril de 2024, de <https://shop-espana.ctseurope.com/documentacioncts/fichastecnicasweb2018/1.1.1.resinaacrilica2016/paraloidb-72esp.pdf>
- CTS®.** (2015). *Regal Varnish. Los nuevos barnices a base de resina Regalrez 1094®*. Recuperado 13 de abril de 2024, de https://shop-espana.ctseurope.com/documentacioncts/fichastecnicasweb2018/7.3barnices%20Caceite%20Cesencias%20Cetc2016/regalvarnishglossemat_tec.pdf
- CTS®.** (2017). *Acril 33*. Recuperado 13 de abril de 2024, de https://shop-espana.ctseurope.com/documentacioncts/fichastecnicasweb2018/1.1.1.resinaacrilica2016/acril33esp_17.pdf
- C.T.S. España S.L.** (2024a). *Disolvente DBE*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://shop-espana.ctseurope.com/1322-disolvente-dbe>
- C.T.S. España S.L.** (2024b). *Etil L-Lactato*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://shop-espana.ctseurope.com/249-etil-l-lactato>
- C.T.S. España S.L.** (2024c). *Propilen Carbonato*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://shop-espana.ctseurope.com/258-propilen-carbonato>

- CYMIT QUÍMICA S.L.** (2024). *2-Ethylhexyl Pelargonate*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://cymitquimica.com/products/AN-AG00EDJO/59587-44-9/2-ethylhexyl-pelargonate/>
- Dalbe.** (s. f.). *Colle PH neutre*. Recuperado 13 de abril de 2024, de https://dalbe.fr/products/colles-ph-neutre-dalbe-250gr-500gr-ou-1-kg?_pos=5&_sid=f42e37f93&_ss=r
- Deffner & Johann.** (s. f.). *Evolon® CR on Roll, 102 cm x 10 m*. Recuperado 1 de mayo de 2024, de <https://deffner-johann.de/en/evolonr-cr-on-roll-102-cm-x-10-m.html>
- ECHA.** (s. f.). *Comprensión de REACH*. Recuperado 6 de mayo de 2024, de <https://echa.europa.eu/es/regulations/reach/understanding-reach>
- EPA.** (s. f.). *Safer Choice*. Safer Chemical ingredients List. Recuperado 13 de abril de 2024, de <https://www.epa.gov/saferchoice/safer-ingredients>
- FactorChem®.** (2024). *Limoneno D-Natural*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://factorchem.com/productos/todos-los-productos/bricolaje-y-hogar/limoneno-d-natural/>
- Fernández, P.** (2016). *Estudio de Carbones obtenidos de distintas materias primas como catalizadores de la síntesis de Solketal* [Trabajo fin de grado, Universidad Zaragoza]. ZAGUAN Repositorio Institucional de Documentos <https://zaguan.unizar.es/record/59124>
- Fife, G. R.** (2021). *Greener solvents in conservation : an introductory guide* (G. R. Fife, Ed.) [Book]. Archetype Publications Ltd.
- Fisher Scientific S.L.** (2024a). *1,3-Dioxolano, 99,5+ %, puro, estabilizado, Thermo Scientific Chemicals*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://www.fishersci.es/shop/products/1-3-dioxolane-99-5-pure-stabilized-thermo-scientific/10227560>
- Fisher Scientific S.L.** (2024b). *Solketal, 97%, Thermo Scientific Chemicals*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://www.fishersci.com/shop/products/solketal-97-thermo-scientific-1/AAL0281436>
- Fisher Scientific S.L.** (2024c). *γ-Valerolactona, 98 %, Thermo Scientific Chemicals*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://www.fishersci.es/shop/products/valerolactone-98-thermo-scientific/10026003>
- GE-IIC.** (s. f.). *Lactato de Etilo*. Recuperado 25 de marzo de 2024, de <https://www.ge-iic.com/fichas-tecnicas/disolventes/lactato-de-etilo/>
- Horváth, I. T., Mehdi, H., Fábos, V., Boda, L., & Mika, L. T.** (2008). *γ-Valerolactone—a sustainable liquid for energy and carbon-based chemicals*. *Green Chemistry*, 10(2), 238-24. <https://doi.org/10.1039/b712863k>

- ICOMOS.** (2015). *Término: limpieza*. EwaGlos European Illustrated Glossary of Conservation terms for wall paintings and architectural surfaces. Recuperado 18 de febrero de 2024, de <https://openarchive.icomos.org/id/eprint/1706/>
- Indagoo.** (2021). *Ficha de seguridad 2-Ethylhexyl Pelargonate*. Recuperado 24 de marzo de 2024, de <https://cymitquimica.com/products/AN-AG00EDJO/59587-44-9/2-ethylhexyl-pelargonate/>
- Kampasakali, E., Fardi, T., Pavlidou, E., & Christofilos, D.** (2021). Towards sustainable museum conservation practices: A study on the surface cleaning of contemporary art and design objects with the use of biodegradable agents. *Heritage*, 4(3), 2023-2043. <https://doi.org/10.3390/HERITAGE4030115>
- Kerton, F., & Marriott, R.** (2013). *Alternative Solvents for Green Chemistry* (pp. FP001-FP004). <https://doi.org/10.1039/9781849736824-fp001>
- Lab4Green.** (s. f.). *Green Varnish Rescue*. Recuperado 7 de abril de 2024, de <https://www.lab4green.it/prodotto/green-varnish-rescue/>
- Lab4green.** (2020). *Ficha de Seguridad Green Rescue*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de https://www.lab4green.it/wp-content/uploads/2023/08/Green_Varnish_Rescue.pdf
- Lambiotte & Cie.** (2022). *Tetraoxaundecane - Results OECD 422 - 410 signed* [Imagen 26].
- Lambiotte & Cie.** (2024). *TOU*. Recuperado 14 de abril de 2024, de <https://www.lambiotte.com/tou/>
- Ledesma, A. S., Sedano, U., Pérez, S., Soler, J. A., Desplechin, H., & Palao, M.** (2006). «Sistemas para la eliminación o reducción de barnices. Estudio de residuos. Protocolos de actuación». Recuperado 05 de mayo de 2024, de https://assets.museothyssen.org/pdf/estudios_de_la_coleccion/restauracion/proyectos_de_investigacion/sistemas Eliminacion EN.pdf
- Macchia, A., Rivaroli, L., & Gianfreda, B.** (2021). The GREEN RESCUE: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings. *Natural Product Research*, 35(14), 2335-2345. <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1675061>
- Macchia, A., Rivaroli, L., & Gianfreda, B.** (2021). The GREEN RESCUE: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings. *Natural Product Research*, 35(14), 2335-2345 [Imagen 5]. <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1675061>
- Macchia, A., Zaratti, C., Biribicchi, C., Colasanti, I. A., Barbaccia, F. I., & Favero, G.** (2023). Evaluation of Green Solvents' Applicability for Chromatic Reintegration of Polychrome Artworks. *Heritage*, 6(3), 3353-3364. <https://doi.org/10.3390/heritage6030177>
- Masschelein-Kleiner, L.** (1994). *Les Solvants* [Book]. Institut royal du patrimoine artistique.

- Matteini, Mauro.** (2001). *La química en la restauración: los materiales del arte pictórico* (Mauro. Matteini & Arcangelo. Moles, Eds.) [Book]. Nerea [etc.].
- Melchiorre, C., Melchiorre, M., Marra, M., Rizzo, E., Fatigati, G., Rossi, P., Cerruti, P., Improta, I., Amoresano, A., Marino, G., Ruffo, F., & Carpentieri, A.** (2023). Green solvents and restoration: Application of biomass-derived solvents in cleaning procedures. *Journal of Cultural Heritage*, 62, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.05.013>
- Melchiorre, C., Melchiorre, M., Marra, M., Rizzo, E., Fatigati, G., Rossi, P., Cerruti, P., Improta, I., Amoresano, A., Marino, G., Ruffo, F., & Carpentieri, A.** (2023). Green solvents and restoration: Application of biomass-derived solvents in cleaning procedures. *Journal of Cultural Heritage*, 62, 3-12.[Imagen 6]. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.05.013>
- Merck Life Science S.L.** (2023a). *Ficha de seguridad Dimetil carbonato*. Recuperado 24 de marzo de 2024, de https://www.merckmillipore.com/ES/es/product/msds/MDA_CHEM-803525?Origin=PDP
- Merck Life Science S.L.** (2023b). *Ficha de seguridad γ-Valerolactona*. Recuperado 24 de marzo de 2024, de <https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/sds/aldrich/v403?userType=anonymous>
- Merck Life Science S.L.** (2024). *Ficha de seguridad 1,3-Dioxolano (estabilizado) para síntesis*. Recuperado 29 de abril de 2024, de https://www.merckmillipore.com/ES/es/product/msds/MDA_CHEM-803553
- Merck Life Science S.L.** (2024). *Ficha de seguridad DL-Limoneno*. Recuperado 29 de abril de 2024, de <https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/sds/mm/8.14546?userType=anonymous>
- Molekula Group.** (2024). *Ficha de seguridad Solketal*. Recuperado 9 de mayo de 2024, de <https://molekula.com/catalog/100-79-8/21833767-solketal-isopropylideneglycerol?locale=es>
- Nualart, A., & Martínez, E.** (2023). *Apuntes de la asignatura de Laboratorio de Sistemas de Limpieza*. Grado de Conservación - Restauración de Bienes Culturales de la Universidad de Barcelona. Inédito.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea.** (2006). *Reglamento (CE) nº 1907/2006*. Recuperado 25 de abril de 2024, de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2006-82750>
- Pérez, L.** (2014). *Formulación y caracterización de emulsiones de limoneno estabilizadas por un tensioactivo polimérico* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]. Depósito de investigación Universidad de Sevilla <https://idus.us.es/handle/11441/84996>

- Pliny.** (1967). *C. Plini Secundi Naturalis historiae libri XXXVII Vol. IV, Libri XXIII-XXX* (Ludovici. Iani & Carolus. Mayhoff, Eds.; 1st ed.) [Book]. B.G. Teubner.
<https://doi.org/10.1515/9783110956313>
- Prat, D., Wells, A., Hayler, J., Sneddon, H., McElroy, C. R., Abou-Shehada, S., & Dunn, P. J.** (2015). CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents. *Green Chemistry*, 18(1), 288-296. <https://doi.org/10.1039/c5gc01008j>
- Rojó, J.** (s. f.). *Densidad y solubilidad*. Recuperado 28 de abril de 2024, de <https://www.profesorjrc.es/apuntes/3%20eso/densidad-solubilidad.pdf>
- Royal Society of Chemistry.** (2024). *2-Ethylhexyl nonanoate*. Recuperado 14 de abril de 2024, de <https://www.chemspider.com/Chemical-Structure.91330.html#>
- Saapedia.** (s. f.). *Pelargonato de 2-etilhexilo*. Recuperado 24 de marzo de 2024, de <http://www.saapedia.org/en/saa/?type=detail&id=2580>
- Saera, A.** (2008). *Estudio comparativo de aplicaciones informáticas para el cálculo de parámetros de solubilidad. Triansol, Solvent Solver y Trisolv*. [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València]. Repositorio institucional UPV <https://riunet.upv.es/handle/10251/13170>
- Saera, A.** (2008). *Estudio comparativo de aplicaciones informáticas para el cálculo de parámetros de solubilidad. Triansol, Solvent Solver y Trisolv* [Imagen 1]. [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València]. Repositorio institucional UPV <https://riunet.upv.es/handle/10251/13170>
- Saera, A.** (2008). *Estudio comparativo de aplicaciones informáticas para el cálculo de parámetros de solubilidad. Triansol, Solvent Solver y Trisolv* [Imagen 2]. [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València]. Repositorio institucional UPV <https://riunet.upv.es/handle/10251/13170>
- Samorì, C., Galletti, P., Giorgini, L., Mazzeo, R., Mazzocchetti, L., Prati, S., Sciutto, G., Volpi, F., & Tagliavini, E.** (2016). The Green Attitude in Art Conservation: Polyhydroxybutyrate-based Gels for the Cleaning of Oil Paintings. *ChemistrySelect*, 1(15), 4502-4508.
<https://doi.org/10.1002/slct.201601180>
- Scicolone, G.** (2002). *Restauración de la pintura contemporánea: de las técnicas de intervención tradicionales a las nuevas metodologías* (A. Viñas, Ed.) [Book]. Nerea.
- SpecialChem.** (2023). *Dioxolane*. Recuperado 6 de mayo de 2024, de <https://adhesives.specialchem.com/product/a-lambiotte-cie-dioxolane>
- Tarín, S., Guardino, X., & Huici, A.** (s. f.). *NTP 726: Clasificación y etiquetado de productos químicos: sistema mundialmente armonizado (GHS)*. Recuperado 13 de abril de 2024, de https://www.insst.es/documents/94886/327446/ntp_726.pdf/c85ed1e7-e638-46af-ae76-e731419099ad

- Tesoro de Arte y Arquitectura.** (s. f.). *Término: limpieza*. Gobierno de España. Ministerio de Cultura y Deporte. Recuperado 6 de mayo de 2024, de <https://www.aatespanol.cl/terminos/300053027>
- Tesoros.** (s. f.). *Término: disolvente*. Gobierno de España. Ministerio de Cultura y Deporte. Recuperado 2 de marzo de 2024, de <https://tesoros.cultura.gob.es/tesoros/materias/1176350.html>
- Thermo Fisher Scientific.** (2023a). *Safety Data Sheet Diethoxymethane, stabilized*. Recuperado 1 de mayo de 2024, de https://www.fishersci.es/chemicalProductData_uk/wercs?itemCode=10023460&lang=ES
- Thermo Fisher Scientific.** (2023b). *Ficha de seguridad Solketal*. Recuperado 22 de marzo de 2024, de <https://www.fishersci.es/store/msds?partNumber=10448120&countryCode=ES&language=es>
- Thermo Fisher Scientific.** (2023c). *Ficha de seguridad Dioxolano*. Recuperado 25 de marzo de 2024, de <https://www.fishersci.es/store/msds?partNumber=10227560&countryCode=ES&language=es>
- Thermo Fisher Scientific.** (2024). *Ficha de seguridad Dimetil Carbonato*. Recuperado 24 de marzo de 2024, de <https://www.fishersci.es/shop/products/dimethyl-carbonate-99-thermo-scientific-1/11474444>
- Topaz.** (s. f.). *Barniz Dammar 75ml Lefranc&Bourgeois*. Recuperado 13 de abril de 2024, de <https://topaztopaz.com/bellas-artes/barniz-dammar-75ml-lefrancbourgeois.html>
- Universidad de Guanajuato.** (s. f.). *Disolventes Verdes*. Recuperado 2 de marzo de 2024, de <http://www.dcne.ugto.mx/respaldo1/Contenido/MaterialDidactico/amezquita/Analitica3/Disolventes%20verdes.pdf>
- Wikipedia.** (2023). *Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos*. [Imagen 3]. Recuperado 13 de abril de 2024, de https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_Globalmente_Armonizado_de_Clasificaci%C3%B3n_y_Etiquetado_de_Productos_Qu%C3%ADmicos
- Zalbidea, M. A.** (2008). *El Triángulo de solubilidad. Una herramienta básica*. [Artículo docente, Universitat Politècnica de Valencia]. Repositorio institucional UPV <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78228/Zalbidea%20-%20EL%20TRI%C3%81NGULO%20DE%20SOLUBILIDAD.%20Una%20herramienta%20b%C3%A1sica..pdf?sequence=1>

12. Anexos

12.1. Anexo I. Clasificación disolventes CHEM 21

Family	Solvent	BP (°C)	FP (°C)	Worst H3xx ^a	H4xx	Safety score	Health score	Env. score	Ranking by default	Ranking after discussion ^b
Water	Water	100	na	None	None	1	1	1	Recommended	Recommended
Alcohols	MeOH	65	11	H301	None	4	7	5	Problematic	Recommended
	EtOH	78	13	H319	None	4	3	3	Recommended	Recommended
	i-PrOH	82	12	H319	None	4	3	3	Recommended	Recommended
	n-BuOH	118	29	H318	None	3	4	3	Recommended	Recommended
	t-BuOH ^c	82	11	H319	None	4	3	3	Recommended	Recommended
Ketones	Benzyl alcohol	206	101	H302	None	1	2	7	Problematic	Problematic
	Ethylene glycol	198	116	H302	None	1	2	5	Recommended	Recommended
	Acetone	56	-18	H319	None	5	3	5	Problematic	Recommended
	MEK	80	-6	H319	None	5	3	3	Recommended	Recommended
	MIBK	117	13	H319	None	4	2	3	Recommended	Recommended
Esters	Cyclohexanone	156	43	H332	None	3	2	5	Recommended	Problematic
	Methyl acetate	57	-10	H302	None	5	3	5	Problematic	Problematic
	Ethyl acetate	77	-4	H319	None	5	3	3	Recommended	Recommended
Ethers	i-PrOAc	89	2	H319	None	4	2	3	Recommended	Recommended
	n-BuOAc	126	22	H336	None	4	2	3	Recommended	Recommended
	Diethyl ether	34	-45	H302	None	10	3	7	Hazardous	HH
	Diisopropyl ether	69	-28	H336	None	9	3	5	Hazardous	Hazardous
	MTBE	55	-28	H315	None	8	3	5	Hazardous	Hazardous
Hydrocarbons	THF	66	-14	H351	None	6	7	5	Problematic	Problematic
	Me-THF	80	-11	H318	None	6	5	3	Problematic	Problematic
	1,4-Dioxane	101	12	H351	None	7	6	3	Problematic	Hazardous
	Anisole	154	52	None	None	4	1	5	Problematic	Recommended
	DME	85	-6	H360	None	7	10	3	Hazardous	Hazardous
	Pentane	36	-40	H304	H411	8	3	7	Hazardous	Hazardous
	Hexane	69	-22	H361	H411	8	7	7	Hazardous	Hazardous
	Heptane	98	-4	H304	H410	6	2	7	Problematic	Problematic
	Cyclohexane	81	-17	H304	H410	6	3	7	Problematic	Problematic
	Me-cyclohexane	101	-4	H304	H411	6	2	7	Problematic	Problematic
Halogenated	Benzene	80	-11	H350	None	6	10	3	Hazardous	HH
	Toluene	111	4	H351	None	5	6	3	Problematic	Problematic
	Xylenes	140	27	H312	None	4	2	5	Problematic	Problematic
	DCM	40	na	H351	None	1	7	7	Hazardous	Hazardous
	Chloroform	61	na	H351	None	2	7	5	Problematic	HH
Aprotic polar	CCl ₄	77	na	H351	H420	2	7	10	Hazardous	HH
	DCE	84	13	H350	None	4	10	3	Hazardous	HH
	Chlorobenzene	132	29	H332	H411	3	2	7	Problematic	Problematic
	Acetonitrile	82	2	H319	None	4	3	3	Recommended	Problematic
	DMF	153	58	H360	None	3	9	5	Hazardous	Hazardous
	DMAc	166	70	H360	None	1	9	5	Hazardous	Hazardous
	NMP	202	96	H360	None	1	9	7	Hazardous	Hazardous
	DMPU	246	121	H361	None	1	6	7	Problematic	Problematic
	DMSO ^c	189	95	None	None	1	1	5	Recommended	Problematic
	Sulfolane ^c	287	177	H360	None	1	9	7	Hazardous	Hazardous
Miscellaneous	HMPA	>200	144	H350	None	1	9	7	Hazardous	HH
	Nitromethane	101	35	H302	None	10	2	3	Hazardous	HH
	Methoxy-ethanol	125	42	H360	None	3	9	3	Hazardous	Hazardous
	Carbon disulfide	46	-30	H361	H412	9	7	7	Hazardous	HH
	Formic acid	101	49	H314	None	3	7	3	Problematic	Problematic
Acids	Acetic acid	118	39	H314	None	3	7	3	Problematic	Problematic
	Ac ₂ O	139	49	H314	None	3	7	3	Problematic	Problematic
Amines	Pyridine	115	23	H302	None	4	2	3	Recommended	Hazardous
	TEA	89	-6	H314	None	6	7	3	Problematic	Hazardous

Tabla 23. Clasificación disolventes clásicos de CHEM 21 (Prat et al., 2015)

Macarena Collazo Inglesini – Disolventes verdes: D-Limoneno, Carbonato de propileno y DBE. Una alternativa más sostenible para la remoción de sustancias filmógenas

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2023-2024

Family	Solvent	CAS	BP (°C)	FP (°C)	Worst H3xx ^a	H4xx ^a	Safety score ^b	Health score	Env. score	Ranking by default
Alcohols	i-Butanol	78-83-1	107	28	H318	None	3	4	3	Recommended
	i-Amyl alcohol	123-51-3	131	43	H315	None	3	2	3	Recommended
	1,3-Propane diol	504-63-2	214	>100	None	None	1	1	7	Problematic
Esters	Glycerol	56-81-5	290	177	None	None	1	1	7	Problematic
	i-Butyl acetate	110-19-0	115	22	H336	None	4	2	3	Recommended
	i-Amyl acetate	123-92-2	142	25	None	None	3	1	5	Recommended
	Glycol diacetate	111-55-7	186	82	None	None	1	1	5	Recommended
	γ-Valerolactone	108-29-2	207	100	n.a.	n.a.	1	5	7	Problematic
Ethers	Diethyl succinate	123-25-1	218	91	n.a.	n.a.	1	5	7	Problematic
	TAME	994-05-8	86	-7	H302	None	6	2	3	Recommended
	CPME	5614-37-9	106	-1	H302	H412	7	2	5	Problematic
Hydro-carbons	ETBE	637-92-3	72	-19	H336	None	7	3	3	Problematic
	D-Limonene	5989-27-5	175	49	H304	H400	4	2	7	Problematic
	Turpentine	8006-64-2	166	38	H302	H411	4	2	7	Problematic
Aprotic polar	p-Cymene	99-87-6	177	27	n.a.	n.a.	4	5	5	Problematic
	Dimethyl carbonate ^c	616-38-6	90	16	None	None	4	1	3	Recommended
	Ethylene carbonate ^d	96-49-1	248	143	H302	None	1	2	7	Problematic
	Propylene carbonate	108-32-7	242	132	H319	None	1	2	7	Problematic
Miscella-neous	Cyrene	53716-82-8	203	61	H319	None	1	2	7	Problematic
	Ethyl lactate	687-47-8	155	47	H318	None	3	4	5	Problematic
	Lactic acid	50-21-5	230	113	H318	None	1	4	7	Problematic
	TH-furfuryl alcohol	97-99-4	178	75	H360	None	1	9	5	Hazardous

Tabla 24. Clasificación disolventes menos comunes de CHEM 21 (Prat et al., 2015)

12.2. Anexo II. Información técnica y principales características de los disolventes verdes seleccionados

12.2.1. Carbonato de Propileno

Es un compuesto orgánico. Se trata de un disolvente aprótico que presenta un elevado momento dipolar, superior al de la acetona (4,9 D frente al 2,9 D). Su fórmula química es $C_4H_6O_3$. Es un líquido incoloro e inodoro.

Las principales características y datos de seguridad que se detallan a continuación se pueden encontrar en el artículo *Disolventes de baja toxicidad y bajo impacto ambiental* (CTS®, s. f.-b).

El carbonato de propileno presenta una **densidad** de 1,2 g/cm³, un **punto de ebullición** alto: 242°C, y una **presión de vapor** muy baja (0,04 kPa) que hace que se evapore muy lentamente. Por lo expuesto, es recomendable su aplicación con gel para evitar la retención del disolvente en la obra y un posible hinchamiento de la capa superficial.

Se recomienda su **uso** para la eliminación de resinas envejecidas, retoques de superficies pictóricas, etc. en forma de gelificado.

En relación a la **solubilidad**, se disuelve al 21% en agua, y en disolventes más volátiles como el acetato de etilo, el alcohol etílico o isopropílico. Por su alta polaridad, puede solubilizar resinas acrílicas y vinílicas como el Paraloid® y Vinavil®.

Respecto a la **presencia de VOC**, fue clasificado como VOC-free por la EPA, mientras que para la legislación europea es considerado bajo en VOC (28%).

Posee una alta **biodegradabilidad** y **no** se obtiene de **fuentes renovables**.

En relación a la **seguridad**, el carbonato de propileno provoca irritación ocular grave (H319), posee una DL₅₀ oral superior a 5000 mg/Kg y una DL₅₀ cutánea superior a 2000mg/Kg. No es inflamable, posee la etiqueta “Safer Choice” otorgada por la EPA y está clasificado como problemático por la CHEM21.

Finalmente, se trata de un producto fácilmente accesible. Es comercializado por C.T.S España S.L. a un precio de 10,89€ el litro (C.T.S. España S.L., 2024c).

12.2.2. DBE

Es el acrónimo de Di-Basic Esters. Su fórmula química es: $\text{CH}_3\text{O}_2\text{C}(\text{CH}_2)_n\text{CO}_2\text{CH}_3$ ($n=2,3,4$). Se trata de una familia de disolventes que se obtienen de la metilación de los ácidos producidos por la fermentación de frutas, por tal motivo poseen un olor muy débil (CTS®, s. f.-b). Consiste en una mezcla de tres ésteres: adipato dimetílico (DMA), glutarato dimetílico (DMG) y succinato dimetílico (DMS). Es un disolvente ecológico que sustituye a disolventes tóxicos muy volátiles como el cloruro de metileno (Macchia et al., 2021).

La producción de los ésteres dibásicos se logra mediante la reacción de esterificación de ácidos dicarboxílicos (ácidos adípicos, glutárico y succínico) con metanol en presencia de catalizadores ácidos homogéneos y/o heterogéneos (CTS®, s. f.-b).

Las principales características y datos de seguridad que se detallan a continuación se pueden encontrar en el artículo *Disolventes de baja toxicidad y bajo impacto ambiental* (CTS®, s. f.-b).

El DBE presenta una **densidad** de $1,09 \text{ g/cm}^3$, un **punto de ebullición** elevado que se sitúa entre los $196\text{--}225^\circ\text{C}$, y una **presión de vapor** ($0,008 \text{ kPa}$) muy baja que hace que se evapore muy lentamente. Por lo expuesto, es recomendable su aplicación con gel para evitar la retención del disolvente en la obra y un posible hinchamiento de la capa superficial.

Se recomienda su **uso** para la eliminación de resinas envejecidas, retoques de superficies pictóricas, etc. en forma de gelificado.

En relación a la **solubilidad**, el DBE es insoluble en agua, parcialmente soluble en hidrocarburos y soluble en alcoholes, cetonas y otros ésteres.

Respecto a la **presencia de VOC**, el DBE fue clasificado como VOC-free.

Es 100% **biodegradable** y obtenido en un 55% de **fuentes renovables** (frutas).

En relación a la **seguridad**, el DBE no es irritante, posee una DL_{50} oral superior a 5000 mg/Kg y una DL_{50} cutánea también de 5000 mg/Kg . No es inflamable, no presenta símbolos de peligrosidad y posee la etiqueta “Safer Choice” otorgada por la EPA. No se encuentra clasificado por la CHEM21.

Finalmente, se trata de un producto fácilmente accesible. Es comercializado por C.T.S España S.L. a un precio de $11,25\text{€}$ el litro (C.T.S. España S.L., 2024a).

12.2.3. Dimetil Carbonato

Es un compuesto orgánico perteneciente al grupo de los carbonatos. Su fórmula química es $C_3H_6O_3$. Es un líquido incoloro que presenta un olor muy bajo (CTS®, s. f.-b).

El dimetil carbonato presenta una **densidad** de $1,07 \text{ g/cm}^3$, un **punto de ebullición** de $86-89^\circ\text{C}$, y una **presión de vapor** de $2,4 \text{ kPa}$ (Merck Life Science S.L., 2023a).

Su **uso** es especialmente para la aplicación de resinas, agentes protectores y consolidantes (CTS®, s. f.-b).

En relación a la **solubilidad**, es miscible con alcohol y éter y es inmiscible con agua (Thermo Fisher Scientific, 2024).

La **presencia de VOC** aún se encuentra en discusión, aunque si se tiene en cuenta la definición del Consejo de la Unión Europea relacionada con el límite de presión de vapor, el dimetil carbonato si presenta VOCs.

Se trata de un compuesto **biodegradable**, pero **no** se obtiene de **fuentes renovables** (CTS®, s. f.-b).

En relación a la **seguridad**, no presenta ningún símbolo de peligrosidad salvo por el hecho que es muy inflamable (H225). Posee una DL_{50} oral superior a 5000 mg/Kg y una DL_{50} cutánea superior a 2000 mg/Kg (Merck Life Science S.L., 2023a). No está clasificado por la EPA pero si por la CHEM21 cómo recomendado.

Finalmente, este disolvente es medianamente accesible. Es comercializado por Fisher Scientific S.L. a un precio de $68,60\text{€}$ los 1000 g , lo que equivale a un litro (Thermo Fisher Scientific, 2024).

12.2.4. Dioxolano

Existe una amplia gama de dioxolanos. La utilizada en pintura es 1,3-dioxolano. Es un compuesto orgánico que contiene un anillo de dioxolano, es decir es un éster cíclico. Su fórmula química es $C_3H_6O_2$ (Thermo Fisher Scientific, 2023c).

Se produce por reacciones entre alcoholes y aldehídos (SpecialChem, 2023).

Las principales características y datos de seguridad que se detallan a continuación se pueden encontrar en la ficha técnica y de seguridad (Thermo Fisher Scientific, 2023c) salvo que se especifique otra cosa:

El dioxolano presenta una **densidad** de $1,064 \text{ g/cm}^3$, un **punto de ebullición** bajo que oscila entre $75\text{-}76^\circ\text{C}$, y una **presión de vapor** de $9,6 \text{ kPa}$, es decir que se evapora rápidamente.

Su aplicación o **uso** es como disolvente de aceites, grasas, ceras y tintes. En la industria de la pintura y de los barnices se presenta como un sustituto en las pinturas metálicas del xileno y del tolueno y como base soluble en agua (Universidad de Guanajuato, s. f.). Cuando se expone al aire sufre autooxidación con formación de peróxidos (Cameo Chemicals, s. f.-a) aunque en el artículo de la Universidad de Guanajuato dice que la formación de peróxidos es escasa.

En relación a la **solubilidad**, es miscible en agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos (Universidad de Guanajuato, s. f.).

Respecto a la **presencia de VOC**, la ficha de seguridad de Thermo Fisher dice que los contiene, sin embargo, el artículo *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021) dice que no, aunque siguiendo el criterio del Consejo de la Unión Europea si los contendría.

No es fácilmente **biodegradable** y **no** se obtiene de **fuentes renovables**.

En relación a la **seguridad**, presenta símbolos de peligrosidad, pero en este punto también hay discrepancias entre las dos fichas consultadas. La ficha de Thermo Fisher dice que provoca irritación ocular grave (H319) y que los líquidos y vapores son muy inflamables (H225) mientras que la ficha de Merck (Merck Life Science S.L., 2024) y la página web del laboratorio agrega a los símbolos mencionados el hecho de que puede perjudicar la fertilidad o dañar el feto (H360). En la página web de CTS® también se menciona que su toxicidad se está investigando y que según un documento oficial REACH-ECHA⁷ se descarta su carcinogenicidad, pero existe sospecha de feto-toxicidad y acción mutágena (CTS®, s. f.-a). Posee una DL_{50} oral de 5200 mg/Kg , y una DL_{50} cutánea de 15000 mg/Kg . A pesar de contener valores elevados DL_{50} , posee un valor VLA muy bajo (20 ppm) indicando una elevada toxicidad, a diferencia de lo mencionado en el artículo de la Universidad de Guanajuato. No se encuentra clasificado por la EPA ni por la CHEM21.

Finalmente, este disolvente es medianamente accesible. Es comercializado por Fisher Scientific S.L. a un precio de $74,70\text{€}$ el litro (Fisher Scientific S.L., 2024a).

⁷ REACH es el reglamento de la Unión Europea que tiene por finalidad la protección de la salud humana y el medio ambiente frente a los riesgos provocados por las sustancias y mezclas químicas. ECHA son las siglas de European Chemicals Agency (ECHA, s. f.).

12.2.5. D-Limoneno

También llamado citrosolv. Es un disolvente apolar cuya fórmula es $C_{10}H_{16}$. Es el componente principal del aceite extraído de las cáscaras de los cítricos, y por lo tanto es un subproducto de la industria de los zumos de frutas. Tiene un agradable olor a limón (Kerton & Marriott, 2013).

Las principales características y datos de seguridad que se detallan a continuación se pueden encontrar en la ficha técnica y de seguridad (Merck Life Science S.L, 2024) salvo que se especifique otra cosa:

El D-Limoneno presenta una **densidad** de $0,84 \text{ g/cm}^3$, un **punto de ebullición** que oscila entre $175\text{-}178^\circ\text{C}$, y una **presión de vapor** de $0,02 \text{ kPa}$, es decir que se evapora lentamente.

Al tratarse de un disolvente apolar, se recomienda su **uso** como posible sustituto de la esencia de trementina y de los disolventes clorados. Presenta un peso y estructura parecidas al ciclohexano y al tolueno por lo que sus propiedades son parecidas convirtiéndolo en un buen candidato para su reemplazo (Pérez, 2014). Es sensible a la exposición a la luz, cuando envejece produce sustancias muy insolubles y cromóforas que pueden manchar las superficies (Cameo Chemicals, s. f.-b).

En relación a la **solubilidad**, es insoluble en agua. Es miscible con casi todos los disolventes orgánicos.

Respecto a la **presencia de VOC**, está clasificado como 100% VOC en la ficha de seguridad, pero al tener una presión de vapor prácticamente igual a la estipulada por el Consejo de la Unión Europea se pone en duda la certeza del dato informado.

Es fácilmente **biodegradable** y se obtiene de **fuentes renovables**.

En relación a la **seguridad**, presenta varios símbolos de peligrosidad: provoca irritación cutánea (H315), puede provocar una reacción alérgica en la piel (H317) y es muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos (H410). Es inflamable (H226). Como puntos a favor: posee una DL_{50} oral de 5300 mg/Kg y no se conoce la DL_{50} cutánea, cumple con criterios de “Safer Choice” pero presenta algunas cuestiones de perfil de riesgo y está clasificado como problemático por la CHEM21 ya que posee un punto de ebullición elevado, toxicidad acuática y es propenso a la oxidación (Prat et al., 2015).

Finalmente, este disolvente es medianamente accesible. Es comercializado por FactorChem® a un precio de $48,50\text{€}$ el litro (FactorChem®, 2024).

12.2.6. Ethylal

También llamado Dietoximetano. Es un acetal obtenido a partir del etanol y un aldehído. Su fórmula molecular es $C_5H_{12}O_2$. Es un líquido volátil incoloro y de olor agradable.

Las principales características y datos de seguridad que se detallan a continuación se pueden encontrar en la ficha técnica y de seguridad (Carl Roth GmbH, 2024c) salvo que se especifique otra cosa:

El ethylal presenta una **densidad** de $0,83 \text{ g/cm}^3$, un **punto de ebullición** de 88°C , y una **presión de vapor** de 17 kPa, es decir que se evapora rápidamente.

Se recomienda su **uso** como disolvente sustituto del diclorometano y el tolueno (Chemical Book, 2023).

En relación a la **solubilidad**, es soluble en agua. Es incompatible con agentes oxidantes fuertes y ácidos. Se descompone en formaldehído y etanol en soluciones ácidas (Chemical Book, 2023).

Respecto a la **presencia de VOC**, la ficha de seguridad dice que los contiene, sin embargo, el artículo *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021) dice que no, aunque aplicando el criterio del Consejo de la Unión Europea si los contendría.

No es fácilmente **biodegradable** (Thermo Fisher Scientific, 2023a) y al ser fabricado a partir de bioetanol el Ethylal es 86% bio **renovable**.

En relación a la **seguridad**, presenta sólo un símbolo de peligrosidad: líquidos y vapores muy inflamables (H225). Posee una DL_{50} oral de 3536 mg/Kg y no se cuenta con la información de la DL_{50} cutánea. No está catalogado por la EPA ni clasificado por la CHEM21.

Finalmente, este disolvente es medianamente accesible. Es comercializado por Carl Roth® a un precio de 69,80€ el litro (Carl Roth GmbH, 2024d).

12.2.7. Etil L-Lactato

Éster del ácido láctico. Su fórmula molecular es $C_5H_{10}O_3$. Es un disolvente de media polaridad que se presenta como un líquido claro, de olor medio (GE-IIC, s. f.).

Se produce mediante el proceso de esterificación en donde participan una solución acuosa de ácido láctico y etanol (GE-IIC, s. f.).

Las principales características y datos de seguridad que se detallan a continuación se pueden encontrar en el artículo *Disolventes de baja toxicidad y bajo impacto ambiental* (CTS®, s. f.-b), salvo que se especifique otra cosa.

El etil L-Lactato presenta una **densidad** de $1,034 \text{ g/cm}^3$, un **punto de ebullición** de 154°C , y una **presión de vapor** de $0,16 \text{ kPa}$, es decir que se evapora lentamente.

Se recomienda su **uso** para la eliminación de barnices envejecidos y como disolvente para el Paraloid® (GE-IIC, s. f.).

En relación a la **solubilidad**, es soluble en agua, aceites de parafina, etanol y la mayor parte de los alcoholes, cetonas, ésteres e hidrocarburos. Suele venderse en soluciones acuosas que oscilan entre el 22 y 85% (GE-IIC, s. f.).

Respecto a la **presencia de VOC**, está clasificado como 100% VOC.

Posee una elevada **biodegradabilidad** (70%) y se obtiene de **fuentes renovables**.

En relación a la **seguridad**, presenta varios símbolos de peligrosidad: provoca lesiones oculares graves (H318) y puede irritar las vías respiratorias (H335). Presenta líquidos y vapores muy inflamables (H226). Posee una DL_{50} oral de 2000 mg/Kg , no se cuenta con información de la DL_{50} cutánea. Posee la etiqueta “Safer Choice” otorgada por la EPA y está clasificado como problemático por la CHEM21.

Finalmente, se trata de un producto fácilmente accesible. Es comercializado por C.T.S España S.L. a un precio de $22,26\text{€}$ los 1000 g , lo que equivale a un litro (C.T.S. España S.L., 2024b).

12.2.8. Green Rescue

Es una mezcla de disolventes orgánicos desarrollada por Yacocu (Youth in Conservation of Cultural Heritage). Se trata de una mezcla de Dioxolano, TOU (2,5,7,10-Tetraoxaundecano) y DBE (Macchia et al., 2021).

Es comercializado por el laboratorio italiano Lab4green, en cuya página web se pueden encontrar las principales características y datos de seguridad que se detallan a continuación (Lab4Green, s. f.) salvo que se especifique otra cosa:

Green Rescue presenta una **densidad** de 1,04 g/cm³, un **punto de ebullición** de 140°C, y una **presión de vapor** de 4,2 kPa, es decir que se evapora rápidamente.

Se recomienda su **uso** para la eliminación de sustancias de polaridad media como Paraloid® B-72, barniz dammar, barnices de retoque y PVA. Se puede utilizar con hisopo o con gelificantes. La baja volatilidad hace que sea recomendable "humedecer" ligeramente el hisopo en lugar de sumergirlo por completo. Se recomienda su uso en forma de gel, interponiendo una hoja de papel japonés, para reducir la penetración del disolvente en sustratos porosos y controlar los tiempos de contacto.

En relación a la **solubilidad**, es parcialmente soluble en agua.

Respecto a la **presencia de VOC**, el artículo *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021) dice que no los contiene, aunque por criterio del Consejo de la Unión Europea si los contendría.

No es fácilmente **biodegradable** (Lab4green, 2020) y **no** se obtiene de **fuentes renovables** sino de una mezcla de acetales, de los cuales la mayoría no se obtienen de fuentes renovables.

En relación a la **seguridad**, presenta un símbolo de peligrosidad: provoca irritación ocular grave (H319). En cuanto a la inflamabilidad, existe una contradicción entre lo mencionado en el artículo *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021) donde dice que no es inflamable y la página web y ficha de seguridad donde dice que contiene líquidos y vapores inflamables (H225). Presenta una DL₅₀ oral de 4300 mg/Kg y no se cuenta con la información de la DL₅₀ cutánea. No posee la etiqueta "Safer Choice" otorgada por la EPA y no se encuentra clasificado por la CHEM21.

Finalmente, se trata de un producto que no es fácilmente accesible. No se comercializa en España, solamente es comercializado por Lab4green, Italia. El precio no se encuentra disponible.

12.2.9. Pelargonato de 2-etilhexilo

También conocido como nonanoato de 2-etilhexilo. Es un éster del ácido pelargónico cuya fórmula molecular es $C_{17}H_{34}O_2$. El ácido pelargónico es un ácido graso con 9 átomos de carbono que se obtiene industrialmente de la escisión oxidativa del ácido oleico o de sus triglicéridos y también recientemente de la escisión oxidativa de aceites vegetales agotados. El proceso de esterificación puede llevarse a cabo utilizando ácidos de Lewis sostenibles como los iones $Zn(II)$ (Melchiorre et al., 2023).

El disolvente presenta una **densidad** de $0,864\text{ g/cm}^3$, un **punto de ebullición** de $311,8^\circ\text{C}$, y una **presión de vapor** de $0,09\text{ kPa}$, es decir que se evapora lentamente (Royal Society of Chemistry, 2024).

El **uso** de los ésteres del ácido pelargónico ha demostrado un alto rendimiento para la disolución/dispersión de colofonias modificadas utilizadas en barnices (Melchiorre et al., 2023). Presenta excelentes capacidades emulsionantes, dispersantes, solubilizantes y lubricantes (Saapedia, s. f.).

En relación a la **solubilidad**, es insoluble en agua y soluble en éter etílico (Saapedia, s. f.).

Respecto a la **presencia de VOC**, no se indica en ninguna de las fuentes consultadas su presencia o su falta, a pesar de ello el valor de presión de vapor indicaría según la normativa europea que si contiene compuestos orgánicos volátiles.

Es **biodegradable** (Saapedia, s. f.) y se obtiene de **fuentes renovables**, más específicamente de aceites vegetales agotados (Melchiorre et al., 2023).

En relación a la **seguridad**, presenta algunos símbolos de peligrosidad: es nocivo por ingestión (H302), provoca irritación cutánea (H315), provoca irritación ocular grave (H319), puede irritar las vías respiratorias (H335). No es inflamable (Indagoo, 2021). No se ha encontrado información sobre los valores DL_{50} . No está clasificado por la EPA y tampoco aparece en el listado de sustancias de CHEM21.

Finalmente, este disolvente no es fácilmente accesible ni por disponibilidad ni por precio. Es comercializado por Cymit Química S.L. a un precio muy elevado de $885,72\text{€}$ los 1000 g , lo que equivale a un litro (CYMIT QUÍMICA S.L., 2024).

12.2.10. Solketal

Se trata de un cetal cuya fórmula molecular es $C_6H_{12}O_3$. Es un compuesto incoloro e inodoro (Fernández, 2016).

Se produce de una reacción de condensación del glicerol con acetona en presencia de catalizadores ácidos como los de Lewis no tóxicos y fácilmente disponibles, como los iones de Fe (III) (Melchiorre et al., 2023).

El solketal presenta una **densidad** de $1,063 \text{ g/cm}^3$, un **punto de ebullición** de 188°C , y una **presión de vapor** de 14,3 kPa (Thermo Fisher Scientific, 2023b).

Se recomienda su **uso** como alternativa al etanol. Solubiliza sustancias filmógenas como la resina dammar, la resina mastic, la goma laca y el Paraloid® B-72 (Melchiorre et al., 2023).

En relación a la **solubilidad**, es completamente soluble en agua, y también en solventes orgánicos (Melchiorre et al., 2023).

Respecto a la **presencia de VOC**, no se indica en ninguna de las fuentes consultadas su presencia o su falta, a pesar de ello el valor de presión de vapor indicaría según la normativa europea que si contiene compuestos orgánicos volátiles.

No es fácilmente biodegradable (25% en 28 días) y se obtiene de **fuentes renovables** por cetalización del glicerol que es una de las formas químicas de base biológica resultantes de la síntesis del biodiésel (Melchiorre et al., 2023).

En relación a la **seguridad**, existen discrepancias entre las fichas. La de Thermo Fisher menciona un solo símbolo de peligrosidad indicando que provoca irritación ocular grave (H319), mientras que la ficha de Molekula Group, además de este símbolo indica que se sospecha que el producto puede dañar al feto (H361d) (Molekula Group, 2024). Como punto a favor, presenta baja inflamabilidad, pero se trata de un líquido combustible (Melchiorre et al., 2023). Posee una DL_{50} oral de 7000 mg/Kg y una DL_{50} cutánea superior a 2000 mg/Kg (Molekula Group, 2024). No está clasificado por la EPA y tampoco aparece en el listado de sustancias de CHEM21.

Finalmente, se trata de un producto no fácilmente accesible por el precio. Es comercializado por Fisher Scientific S.L. a un precio de 172€ los 1000 g, lo que equivale a un litro (Fisher Scientific S.L., 2024b).

12.2.11. TOU

También conocido como 2,5,7,10-Tetraoxaundecano. Su fórmula química es $C_7H_{16}O_4$. Es un líquido incoloro de olor característico (Lambiotte & Cie., 2024).

Se produce por reacción entre alcoholes y aldehídos, es decir se trata de un acetal. Los acetales forman una familia química con estructuras lineales o cíclicas que son estables en ambientes neutros y básicos. Debido a su alta solvencia, los acetales se utilizan a menudo como disolventes (Carl Roth GmbH, 2024g).

Las principales características y datos de seguridad que se detallan a continuación se pueden encontrar en la ficha técnica y de seguridad (Carl Roth GmbH, 2024g) salvo que se especifique otra cosa.

El TOU presenta una **densidad** de 0,9921 g/cm³, un **punto de ebullición** alto de 201,5°C, y una **presión de vapor** muy baja de 0,022 kPa, es decir que se evapora lentamente.

Su aplicación o **uso** es como disolvente o aditivo de disolventes clásicos. TOU es adecuado para adhesivos de PVC, adhesivos de PU, adhesivos termosellables y pegamentos de contacto.

En relación a la **solubilidad**, es miscible en agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos.

Respecto a la **presencia de VOC**, la ficha de seguridad de Carl Roth GmbH dice que los contiene, sin embargo, el artículo *The Green Rescue: a 'green' experimentation to clean old varnishes on oil paintings* (Macchia et al., 2021) dice que no. Sin embargo, si se tiene en cuenta la definición del Consejo de la Unión Europea los tendría, pero en un porcentaje muy bajo.

No es fácilmente biodegradable (4,3% en 28 días) y **no** se obtiene de **fuentes renovables**.

En relación a la **seguridad**, no presenta ningún símbolo de peligrosidad. Es combustible pero no fácilmente inflamable. Posee una DL₅₀ oral superior a 5000 mg/Kg, y una DL DL₅₀ cutánea superior a 2000 mg/Kg. No se encuentra clasificado por la EPA ni por la CHEM21.

A pesar de las características mencionadas que presentan al disolvente TOU como una alternativa “verde”, luego de conversaciones mantenidas con la Technical & Sales Support del laboratorio Lambiotte & Cie, se dejó en evidencia la existencia de un estudio de **toxicidad** OECD TG 422 que actualmente está en curso y que como resultado preliminar podría clasificar al disolvente como CRM categoría 2⁸(Lambiotte & Cie, 2022). Este documento se puede visualizar en el anexo III.

Finalmente, este disolvente es medianamente accesible. Es comercializado por Carl Roth® a un precio de 71,95€ el litro (Carl Roth GmbH, 2024f).

⁸ CRM significa Carcinógeno, mutágeno y Reprotóxico. Se trata de una serie de sustancias químicas muy peligrosas en estado puro que pueden causar efectos nocivos para la salud de las personas tanto solas como en mezclas. La categoría 2 se refiere a las sustancias donde se tienen datos suficientes y fiables obtenidos de estudios con animales u otro tipo de ensayos para afirmar que pueden producir cáncer, alteraciones genéticas hereditarias o problemas de fertilidad (Barin, 2022).

12.2.12. γ -valerolactona (GVL)

Se trata de un compuesto orgánico de un éster biorenovable cuya fórmula química es: $C_5H_8O_2$. Se presenta como un líquido transparente cuya coloración va del incoloro al amarillo pálido (Merck Life Science S.L., 2023b). Tiene un olor característico a hierbas (Horváth et al., 2008).

Se obtiene a partir de una fracción lignocelulósica, más específicamente de la reducción del ácido levulítico y la lactonización del ácido hidroxilo resultante (Melchiorre et al., 2023).

El GVL presenta una **densidad** de 1,05 g/cm³, un **punto de ebullición** de 207-208°C, y una **presión de vapor** de 0,044 kPa, es decir que se evapora lentamente (Merck Life Science S.L., 2023b).

Se ha encontrado una aplicación o **uso** en el patrimonio cultural como disolvente confinado en geles a base de polihidroxibutirato (Melchiorre et al., 2023).

En relación a la **solubilidad**, la ficha de seguridad de Merck dice que es soluble en agua, pero no se menciona su solubilidad en disolventes orgánicos. Sin embargo, en el estudio realizado por Melchiorre y expuesto en el artículo *Green solvents and restoration: Application of biomass-derived solvents in cleaning procedures* (Melchiorre et al., 2023), se menciona que el GVL se utilizó en mezclas con otros disolventes como el Solketal y el Pelargonato de 2-etilhexilo.

Respecto a la **presencia de VOC**, la ficha de seguridad no contiene información al respecto. A pesar de ello, si se tiene en cuenta la definición del Consejo de la Unión Europea tendría compuestos orgánicos volátiles, pero en un porcentaje muy bajo.

Es fácilmente **biodegradable**, se obtiene de **fuentes renovables** ya que puede sintetizarse a partir de biomasa lignocelulósica y tiene un **perfil eco toxicológico bajo** (Melchiorre et al., 2023).

En relación a la **seguridad**, presenta dos símbolos de peligrosidad: provoca irritación cutánea (H315) y provoca irritación ocular grave (H319). No es inflamable y posee una DL₅₀ oral de 9249 mg/Kg y una DL₅₀ cutánea superior a 2102 mg/Kg. Los estudios realizados en relación a la mutagenicidad en células germinales dieron todos negativos como así también no se mostraron efectos cancerígenos en experimentos con animales (Merck Life Science S.L., 2023b). No está clasificado por la EPA y está clasificado como problemático por la CHEM21. Esta puntuación fue dada por defecto ya que todavía no ha sido considerado por REACH por ser un producto que se produce a escala pequeña y/o ser un producto intermedio (Prat et al., 2015).

Finalmente, este disolvente no es fácilmente accesible a nivel precio. Es comercializado por Fisher Scientific S.L. a un precio de 234€ el litro (Fisher Scientific S.L., 2024c).

12.3. Anexo III. Estudio toxicidad disolvente TOU



Lambiotte & Cie S.A. Avenue des Aubépines 18 B-1180 Brussels	Tel.: +32 2 374 44 65 Fax: +32 2 375 31 55 E-mail: info@lambiotte.com	Plant & Laboratory Grand'Rue 79 B-6724 Marbehan	Tel.: +32 63 41 00 80 Fax: +32 63 41 16 98 E-mail: plant@lambiotte.com
--	---	---	--

June 3, 2022

2,5,7,10-Tetraoxaundecane: Reproduction/Developmental Toxicity

In 2012, an OECD 410 study (Repeated dose dermal toxicity – 28 days) was carried out on rabbits to assess the systemic toxicity of 2,5,7,10-tetraoxaundecane following dermal exposure. Exposure of rabbits up to the limit dose of 1000 mg/kg/day caused no adverse effects, including on male and female reproductive organs.

In order to assess the general systemic and reproduction/developmental toxicity of 2,5,7,10-Tetraoxaundecane (TOU), Lambiotte & Cie recently decided to perform a Combined Repeated Dose Toxicity Study with the Reproduction/Developmental Toxicity Screening Test (OECD TG 422).

During this study, TOU was administered daily to Wistar rats by oral gavage at doses of 0, 60, 180, 400 or 1000 mg/kg/day. Males were treated for two weeks before pairing, throughout pairing and up to necropsy after a minimum of five consecutive weeks. F0 females were treated daily for two weeks before pairing, throughout pairing and gestation and until Day 12 of lactation. Females were allowed to litter, rear their offspring and were killed on Day 13 of lactation.

Oral administration of TOU at doses up to and including 1000 mg/kg bw/day was generally well tolerated, with no test item-related premature deaths, clinical signs or post-dosing observations, no effects on sensory reactivity, grip strength or locomotor activity and no adverse effects on body weight performance or food intake.

However, the dose level of 1000 mg/kg/day induced reproductive toxicity in terms of mating performance and fertility and was associated with adverse histopathological changes in the testes and epididymides. These adverse changes were only observed following oral exposure and not during the dermal toxicity study.

Despite the effects being manifest at the highest dose tested (1000 mg/kg bw/day), a classification of reproductive toxicant cannot be excluded.

The OECD TG 422 study is still ongoing and more information will be communicated when available.

Bérangère
Detraux
(Authentication)

Bérangère Detraux
Regulatory Toxicologist

Signature numérique de Bérangère
 Date aux Authentifications
 DN: cn=Bérangère Detraux,
 (Authentication), ou=Detraux,
 o=Lambiotte-Bérangère
 serialNumber=87039937242
 Date: 2022.06.03 10:40:58 +0200

www.lambiotte.com

V.A.T. BE 0403.072.909
C.B.C.: 191-6504352-80
B.B.L.: 310-0146467-83
Fortis: 267-0361406-03

IBAN: BE 47 1916 5043 5280	BIC: CREGBEBB
IBAN: BE 14 3100 1464 6783	BIC: BBRUBEBB
IBAN: BE 21 2670 3614 0603	BIC: GEBABEBB



Imagen 26. Estudio en curso toxicidad disolvente TOU (Lambiotte & Cie, 2022)

12.4. Anexo IV. Información técnica y características de las sustancias filmógenas

12.4.1. Barniz Dammar Extrafino de la marca Lefranc & Bourgeois:

Es un barniz a base de resina dammar, aceite de lino y esencia de trementina. Proporciona una terminación muy brillante y protección UV. Como contrapartida, es inflamable (Topaz, s. f.).

La resina es producida por algunas plantas de la familia de las celsapináceas y en particular por la *Agathis dammara*. El dammar posee una buena elasticidad y adhesividad y es una de las resinas más aptas para la fabricación de barnices y también se utiliza como aglutinante, en emulsión con los temple. Se puede disolver en disolventes poco polares como los hidrocarburos aromáticos, pero es poco soluble en alcoholes (Matteini, 2001). También relacionado a la solubilidad es importante mencionar que posee unos valores F_d que se encuentran entre 54-90 para aquellas resinas dammar frescas o de reciente aplicación y de unos valores F_d entre 54-67 para las resinas dammar oxidadas (Ledesma et al., 2006).

La polaridad de la resina dammar aumenta con el envejecimiento, esto significa que para su eliminación es necesario la utilización de disolventes más polares que los utilizados en el momento de su aplicación (Bestetti, 2020). En relación a su degradación, el dammar tiende a cristalizar y amarillear, y a volverse insoluble con el tiempo, pero ofrece una buena protección contra la humedad (Scicolone, 2002).

12.4.2. Goma Laca al 20% en etanol:

También llamada shellac, es un material resinoso de origen animal obtenida de la secreción de un insecto de la familia de las cochinillas (*Coccus laca*). Su composición no se conoce al 100%, pero se sabe que posee principalmente poliésteres de distintos oxiácidos que son solubles en alcohol, pequeñas cantidades de sustancias cerosas (cera de goma laca) que son insolubles en alcohol y un porcentaje menor de una sustancia colorante de color rojo oscuro, soluble en agua (lac dye) (Matteini, 2001). Es soluble en alcohol, álcalis, ácidos y piridina y parcialmente soluble en éter etílico, acetona y acetato de amilo. Es insoluble en agua (Scicolone, 2002). También relacionado a la solubilidad es importante mencionar que posee unos valores F_d que se encuentran entre 30-54 (Ledesma et al., 2006). Principalmente se utiliza en la confección de barnices sobre base alcohólica, de colores que van del rojizo al amarillo claro para el barnizado de maderas. En pintura se ha utilizado muy poco debido a su tendencia a oscurecer y por su alto grado de sensibilidad a la humedad. Sin embargo, si se ha utilizado como aglutinante blando, como ingrediente en la preparación de adhesivos y principalmente como consolidante en pinturas murales. Como principal defecto se puede mencionar su tendencia a volverse irreversible con el envejecimiento tendiendo a oscurecer y a perder brillo si están expuestas a mucho calor (Matteini, 2001).

12.4.3. Paraloid® B-72 al 5% en acetona:

El Paraloid® B-72 es una resina acrílica sólida (metilacrilato-etilmetacrilato). Se comercializa en pequeñas bolas que pueden ser disueltas en diferentes disolventes. Es soluble en: cetonas (acetona, metiletilcetona), ésteres y éteres (etilo acetato, butil acetato y cellosolve acetato, dowanol PM, etc), hidrocarburos aromáticos (tolueno, xileno, y mezclas como el disolvente

nitro), hidrocarburos clorurados (cloruro de metileno, cloretene). Es insoluble en agua y muy poco en alcohol etílico e hidrocarburos alifáticos (CTS®, 2013). También relacionado a la solubilidad es importante mencionar que posee unos valores F_d que se encuentran entre 36-85 (Ledesma et al., 2006).

Puede ser empleada como consolidante, adhesivo o fijativo (CTS®, 2013). Como aspectos favorables se puede mencionar que durante su almacenamiento no se altera cromáticamente y que permanece soluble en los mismos disolventes con los que fue aplicado (Bestetti, 2020).

12.4.4. Regal Varnish Gloss de la marca CTS®:

Es un barniz incoloro y estable, preparado a través de la disolución de Regalrez 1094® en esencia de petróleo desaromatizada. El Regalrez 1094® es un polímero de bajo peso molecular (CTS®, 2015) que tiene una solubilidad inmediata en disolventes totalmente alifáticos como la ligroína, esencias de petróleo, alcoholes minerales y aguarrás permitiendo la exclusión de disolventes aromáticos de su preparación (Bestetti, 2020). A la vez, el barniz es fácilmente reversible en hidrocarburos alifáticos, como White Spirit D40 de CTS® o esencia de petróleo. No es soluble en disolventes polares como agua y alcoholes (Borgioli, 2005). Al mantener una baja polaridad permite evitar fenómenos de lixiviación que se dan sobre todo con disolventes de polaridad media como los clorados o los disolventes polares como los alcoholes (Bestetti, 2020).

Presenta un bajo nivel de toxicidad y un punto de ebullición 140-160°C y es inflamable (CTS®, 2015).

12.4.5. Acetato de polivinilo (cola blanca Vinyl pH neutro Dalbe):

Cola blanca vinílica de pH neutro, especialmente concebida para encolar papel, tela y cartón. Diluible con agua hasta un 5% (Art Kiosco, s. f.). Es extrafuerte y de rápido fraguado. Su película se vuelve transparente e irreversible al secar (Dalbe, s. f.).

Los acetatos de polivinilo poseen dentro de sus principales características un alto poder adhesivo y gran resistencia al envejecimiento. No suelen modificarse de manera problemática con la luz, sufren oxidaciones, pero sin degradarse irreversiblemente y son insensibles a la humedad relativa del ambiente. Son solubles en cetonas, éteres, alcohol, ácido acético, tolueno, hidrocarburos aromáticos, clorados y otros (Scicolone, 2002). También relacionado a la solubilidad es importante mencionar que posee unos valores F_d que se encuentran entre 55-85 (Ledesma et al., 2006).

Otra característica es que se mantienen solubles durante bastante tiempo. Tienden a reticular solo si se encuentran en un ambiente muy seco y pueden amarillear si se calientan por encima de los 100°C y volverse insolubles. Por último, no resisten a los álcalis (Scicolone, 2002).

12.4.6. Acril 33 de la marca CTS® sin diluir (puro):

Es una resina acrílica (copolímero etil acrilato – metil metacrilato) pura al 100% en dispersión acuosa. Es una alternativa del Primal AC-33® debido a su formulación química similar. Presenta un aspecto líquido lechoso blanco y olor a amoníaco. Posee muy buena resistencia a los factores atmosféricos y estabilidad química. Los principales usos son como aditivo para morteros de inyección, estucado, reintegración; ligante para veladuras, pigmentos naturales y sintéticos; consolidante y fijador de capas pictóricas, adhesivo para documentos de papel. Entre sus principales propiedades se puede mencionar su elevada resistencia al amarillamiento y a los

rayos UV, su óptimo poder ligante, su gran resistencia a los alcalinos y su color transparente (CTS®, 2017).

12.4.7. Colofonia

La colofonia se obtiene en general de la secreción de distintas especies de pino. Se puede disolver en esencia de trementina, hidrocarburos aromáticos, alcoholes, cetonas, disolventes clorados, éter, etc. Se utilizó solamente de manera ocasional como resina de barnices, ya que presenta un rápido deterioramiento caracterizado por oscurecimiento, aumento de la sensibilidad al agua y pérdida de resistencia mecánica y de brillo por acción de la humedad (Barros García, 2005).

12.5. Anexo V. Cálculo de mezclas de los disolventes verdes seleccionados

Mezcla	Disolvente	%Volumen	Parametros de solubilidad			Cálculo %			Parametros de solubilidad mezcla		
			Fd	Fp	Fh	Fd	Fp	Fh	Fd	Fp	Fh
	D-Limoneno	100	74	8	18	74,00	8,00	18,00	74,00	8,00	18,00
Mezcla 1	D-Limoneno	90	74	8	18	66,60	7,20	16,20	71,40	11,00	17,60
	Carbonato de propileno	10	48	38	14	4,80	3,80	1,40			
Mezcla 2	D-Limoneno	80	74	8	18	59,20	6,40	14,40	68,80	14,00	17,20
	Carbonato de propileno	20	48	38	14	9,60	7,60	2,80			
Mezcla 3	D-Limoneno	70	74	8	18	51,80	5,60	12,60	66,20	17,00	16,80
	Carbonato de propileno	30	48	38	14	14,40	11,40	4,20			
Mezcla 4	D-Limoneno	60	74	8	18	44,40	4,80	10,80	63,60	20,00	16,40
	Carbonato de propileno	40	48	38	14	19,20	15,20	5,60			
Mezcla 5	D-Limoneno	50	74	8	18	37,00	4,00	9,00	61,00	23,00	16,00
	Carbonato de propileno	50	48	38	14	24,00	19,00	7,00			
Mezcla 6	D-Limoneno	40	74	8	18	29,60	3,20	7,20	58,40	26,00	15,60
	Carbonato de propileno	60	48	38	14	28,80	22,80	8,40			
Mezcla 7	D-Limoneno	30	74	8	18	22,20	2,40	5,40	55,80	29,00	15,20
	Carbonato de propileno	70	48	38	14	33,60	26,60	9,80			
Mezcla 8	D-Limoneno	20	74	8	18	14,80	1,60	3,60	53,20	32,00	14,80
	Carbonato de propileno	80	48	38	14	38,40	30,40	11,20			
Mezcla 9	D-Limoneno	10	74	8	18	7,40	0,80	1,80	50,60	35,00	14,40
	Carbonato de propileno	90	48	38	14	43,20	34,20	12,60			
	Carbonato de propileno	100	48	38	14	48,00	38,00	14,00	48,00	38,00	14,00
Mezcla 10	D-Limoneno	90	74	8	18	66,60	7,20	16,20	71,90	8,70	19,40
	DBE	10	53	15	32	5,30	1,50	3,20			
Mezcla 11	D-Limoneno	80	74	8	18	59,20	6,40	14,40	69,80	9,40	20,80
	DBE	20	53	15	32	10,60	3,00	6,40			
Mezcla 12	D-Limoneno	70	74	8	18	51,80	5,60	12,60	67,70	10,10	22,20
	DBE	30	53	15	32	15,90	4,50	9,60			
Mezcla 13	D-Limoneno	60	74	8	18	44,40	4,80	10,80	65,60	10,80	23,60
	DBE	40	53	15	32	21,20	6,00	12,80			
Mezcla 14	D-Limoneno	50	74	8	18	37,00	4,00	9,00	63,50	11,50	25,00
	DBE	50	53	15	32	26,50	7,50	16,00			
Mezcla 15	D-Limoneno	40	74	8	18	29,60	3,20	7,20	61,40	12,20	26,40
	DBE	60	53	15	32	31,80	9,00	19,20			
Mezcla 16	D-Limoneno	30	74	8	18	22,20	2,40	5,40	59,30	12,90	27,80
	DBE	70	53	15	32	37,10	10,50	22,40			
Mezcla 17	D-Limoneno	20	74	8	18	14,80	1,60	3,60	57,20	13,60	29,20
	DBE	80	53	15	32	42,40	12,00	25,60			
Mezcla 18	D-Limoneno	10	74	8	18	7,40	0,80	1,80	55,10	14,30	30,60
	DBE	90	53	15	32	47,70	13,50	28,80			
	DBE	100	53	15	32	53,00	15,00	32,00	53,00	15,00	32,00
Mezcla 19	Carbonato de propileno	75	48	38	14	36,00	28,50	10,50	49,25	32,25	18,50
	DBE	25	53	15	32	13,25	3,75	8,00			
Mezcla 20	Carbonato de propileno	50	48	38	14	24,00	19,00	7,00	50,50	26,50	23,00
	DBE	50	53	15	32	26,50	7,50	16,00			
Mezcla 21	Carbonato de propileno	25	48	38	14	12,00	9,50	3,50	51,75	20,75	27,50
	DBE	75	53	15	32	39,75	11,25	24,00			

Tabla 25. Cálculo de las mezclas de los disolventes verdes seleccionados (D-Limoneno, Carbonato de propileno, DBE)

12.6. Anexo VI. Área de solubilidad goma laca y resina dammar

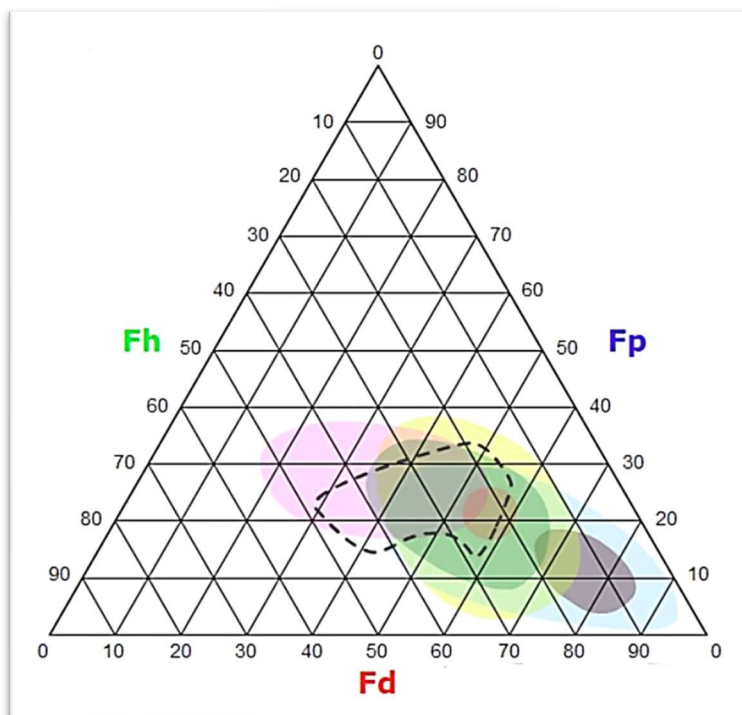


Imagen 27. Área de solubilidad de la goma laca

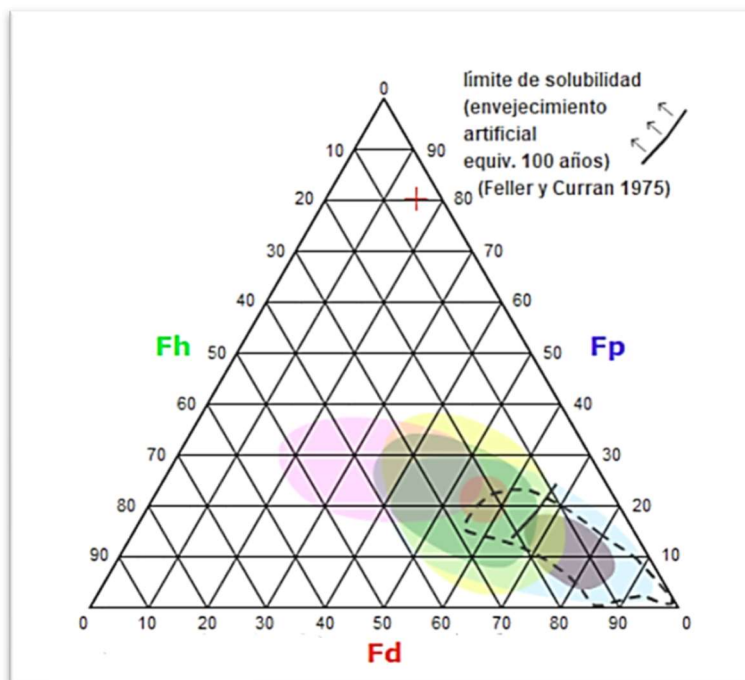


Imagen 28. Área de solubilidad de la resina dammar

12.7. Anexo VII. Links fichas técnicas y de seguridad de los disolventes verdes

12.7.1. Carbonato de propileno

<https://shop-espana.ctseurope.com/258-propilen-carbonato>

12.7.2. DBE

<https://shop-espana.ctseurope.com/1322-disolvente-dbe>

12.7.3. Dimetil Carbonato

https://www.merckmillipore.com/ES/es/product/msds/MDA_CHEM-803525?Origin=PDP

12.7.4. Dioxolano

<https://www.fishersci.es/store/msds?partNumber=10227560&countryCode=ES&language=es>

12.7.5. D-Limoneno

<https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/sds/mm/8.14546?userType=anonymous>

12.7.6. Ethylal

<https://www.carlroth.com/medias/SDB-0787-AU-EN.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyNjQ0NzN8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFESXIMMmc1WkM4NU1UZzBOamM0TmptjME5EWXIMMU5FUWw4d056ZzNYMEZWWD BWT0xuQmtaZ3xiOTU5NWFiMjhjNDU0NTBjZmZmNDI1MDdkN2Y4Y2Q0NDRmYjkwZmE3NDRk OWEyMmY4YmVkJDU4NTIhNjIxN2Nl>

12.7.7. Etil L-Lactato

<https://shop-espana.ctseurope.com/249-etil-l-lactato>

12.7.8. Green Rescue

https://www.lab4green.it/wp-content/uploads/2023/08/Green_Varnish_Rescue.pdf

12.7.9. Pelargonato de 2-etilhexilo

<https://cymitquimica.com/products/AN-AG00EDJO/59587-44-9/2-ethylhexyl-pelargonate/>

12.7.10. Solketal

<https://molekula.com/catalog/100-79-8/21833767-solketal-isopropylideneglycerol?locale=es>

12.7.11. TOU

<https://www.carlroth.com/medias/SDB-0786-AU-EN.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyNDcxNDN8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFETXhMMmhoTXk4NU1UZzBOamM0T0RBMU5UTTBMU5FUWw4d056ZzJYMEZWW DBWT0xuQmtaZ3w2MWM0ZWQxMzEzNzdmNTkyOWQxZTIkMzlhOWVhNTM1ZGJhNmUzY2Z mYzRhNjQ4MzY4MzNjODZiNjRjODdiMGUy>

12.7.12. γ -Valerolactona

<https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/sds/aldrich/v403?userType=anonymous>