



Pinturas Aeronáuticas

Generación Odines 2025

Escuela Militar de Aeronáutica

Profesores referentes:

Mag. Prof. Laura Analía Otte Morales

Mag. (c). Prof. María Caputi

Prof. Claudia Durán.

Prof. Ximena Perez

Apoyo en laboratorio:

Prof. Francisco Fernández

Coordina:

Mag. Lic. Silvina Longo

Noviembre 2025

Generación Odines

Asp. Lucas Inzaurrealde.

Asp. Lucas da Rosa.

Asp. Bruno Camejo.

Asp. Noelia Profumo.

Asp. Mauro Paula.

Asp. Antonella Freitas.

Asp. David Ballesté.

Asp. Eric Campos.

Asp. Matheo Averó.

Asp. Elías López.

Asp. Evelyn López.

Asp. Emiliano Castro.

Asp. Valentín Gutiérrez.

Asp. Anibal Freyre.

Asp. Wilian Budez.

Asp. Santiago Cardeillac.

Asp. Federico Silva.

Asp. Sabina del Río.

Asp. Martina Barceló.

Índice

Pinturas Aeronáuticas	1
Generación Odines	2
Índice	3
Resumen	4
Abstract.....	5
Capítulo 1. Fundamentación del Proyecto	6
1.1 Introducción.....	6
1.2 Fundamentación y objetivos	6
Capítulo 2. Propiedades fisicoquímicas de las Pinturas aeronáuticas.....	8
2.1 Informes Experimentales	8
2.1.1 Resistencia a los ambientes salinos	10
2.1.2 Resistencia a Productos Químicos	10
2.1.3 Resistencia a Radiación Ultravioleta.....	11
2.1.4 Resistencia a la Abrasión	12
2.1.5 Resistencia a los cambios de temperatura	13
2.1.6 Adherencia	14
2.1.7 Secado	14
2.1.8 Conductividad Eléctrica	15
2.1.9 Viscosidad y densidad	16
Capítulo 3. Camuflaje	17
3.1 Concepto de camuflaje	17
3.2 Funciones matemáticas con GeoGebra.....	17
3.3 Camuflajes por Bioma	19
3.3.1 Bosque.....	19
3.3.2 Desierto	21
3.3.3 Ártico	23
3.3.4 Selva.....	26
3.3.5 Urbano.....	29
3.3.6 Náutico	31
3.3.7 Pradera	33
4. Conclusión.....	36
5. Bibliografía	38

Resumen

El proyecto correspondiente a la Generación Odines 2025 de la Escuela Militar de Aeronáutica aborda el estudio de las pinturas aeronáuticas, con el propósito de comprender sus propiedades físico-químicas y su importancia en la seguridad, durabilidad y eficiencia operativa de las aeronaves. Los aspirantes realizaron ensayos sobre adherencia, resistencia química, térmica, a la abrasión, radiación ultravioleta y salinidad, manteniendo sus propiedades estructurales y estéticas. En contraste, las pinturas caseras mostraron degradación, pérdida de adherencia y escasa durabilidad. El proyecto integró conocimientos de física, química y matemáticas, promoviendo la aplicación práctica de conceptos científicos en el ámbito aeronáutico. Además, fomentó el trabajo en equipo, la investigación y la innovación tecnológica medida, comparando pinturas industriales y formulaciones artesanales. Los resultados evidenciaron que las pinturas aeronáuticas profesionales presentan una resistencia significativamente superior frente a agentes ambientales y químicos ante la utilización de inteligencia artificial para el diseño de camuflajes. En síntesis, la investigación destaca la importancia fundamental de los recubrimientos especializados para garantizar la protección y conservación de la estructura de las aeronaves.

Abstract

The Generation Odines 2025 project, developed at the Escuela Militar de Aeronáutica, focuses on the study of aeronautical paints to understand their physicochemical properties and their relevance to aircraft safety, durability, and operational efficiency. The cadets conducted experiments on adhesion, chemical, thermal, ultraviolet, abrasion, and salinity resistance, comparing industrial paints with handmade formulations. The results showed that professional aeronautical paints coatings exhibit significantly greater resistance to environmental and chemical factors, preserving both their structural and aesthetic qualities. In contrast, homemade paints displayed degradation, loss of adhesion, and limited durability. The project integrated knowledge from physics, chemistry, and mathematics, promoting the practical application of scientific concepts in the aeronautical field. It also encouraged teamwork, research, and technological innovation through the use of artificial intelligence for camouflage design. In summary, the research highlights the essential role of specialized coatings in ensuring the protection and preservation of aircraft structures.

Capítulo 1. Fundamentación del Proyecto

1.1 Introducción

El proyecto sobre pinturas aeronáuticas nace como una iniciativa impulsada por el Director de la Escuela Militar de Aeronáutica “(EMA)”, con el propósito de abordar y profundizar el conocimiento técnico y científico relacionado con los recubrimientos utilizados en aeronaves, a través de aspectos físicos, químicos y matemáticos.

Este proyecto fomenta la investigación y el trabajo en equipo entre los aspirantes. A nivel formativo, permite investigar fenómenos físicos (como la adherencia y resistencia), químicos (como la composición de las pinturas a través de ensayos) y matemáticos (diseño de camuflados).

1.2 Fundamentación y objetivos

Las pinturas, unos de los productos más utilizados por la humanidad desde que se descubrieron, suelen ser clasificadas como meras herramientas decorativas, pues su utilización suele cerrarse a la decoración, sin tener en cuenta las funciones prácticas que tienen. Esto sucede porque, aparte de embellecer los objetos y hogares de las personas, brindan características que las hacen más resistentes a las inclemencias de la rutina y el tiempo. Por ejemplo: las pinturas utilizadas en las casas y los barnices de las maderas, además de ser de colores que resaltan la calidez de un hogar o la magnificencia de la madera, tienen componentes específicos que logran demorar el avance de la humedad.

Según la charla con el especialista en pinturas aeronáuticas, Enrique Romualdi, las pinturas aeronáuticas no se alejan de este concepto. Dichas pinturas tienen el propósito de lograr que los materiales que componen las aeronaves resistan todas las adversidades con las que se encuentran al

emprender vuelo, entre ellas los Rayos UV, los cambios de temperatura, la salinidad (en caso de zonas próximas al océano) e incluso el roce con el aire mismo.

El proyecto busca unificar los conocimientos y pasos más importantes para realizar dichas pruebas, de forma que se pueda usar como material de consulta y práctica en la Fuerza Aérea Uruguaya. Con el fin de que esto se lleve a cabo, se deben combinar diversas áreas: la física, para entender cómo la pintura se adhiere al aluminio y qué tan resistente es al desgaste provocado por los diferentes agentes externos; la química, para analizar su composición y cómo reacciona a determinados componentes químicos; y la matemática, construcción artesanal de camuflados mediados por software e inteligencia artificial generativa.

Los estudiantes adquieren estos conocimientos gracias a experiencias puntuales en el Escuadrón de Vuelo Básico y en la visita a la fábrica de pinturas, Crisoles. Sin embargo, este proyecto pretende organizar y profundizar esos conocimientos, para que se conviertan en un recurso de consulta y aprendizaje continuo. Estas acciones permitieron integrar la teoría con la práctica en torno a la fabricación, propiedades y aplicación de pinturas en aeronaves. A lo largo del proceso se trabajó con entrevistas a especialistas, experiencias de laboratorio y la orientación de profesionales, lo que hizo posible elaborar pinturas artesanales y probar su desempeño en superficies de aluminio simulando fuselajes. Esto permitió comparar recetas caseras con productos industriales y comprender mejor los procedimientos, materiales y condiciones de uso en el mantenimiento aeronáutico. Como cierre, el aporte de un pintor especializado y el empleo de un tipo de almacenamiento de combustible de un Aermacchi resultan elementos clave para culminar y presentar el proyecto final.

Capítulo 2. Propiedades fisicoquímicas de las Pinturas aeronáuticas

2.1 Informes Experimentales

Según Pinturas RAM (Radar Absorbing Materials, 2021), las propiedades fisicoquímicas de las pinturas aeronáuticas tienen un impacto directo y significativo en el rendimiento, la seguridad y la eficiencia operativa de las aeronaves. Una pintura mal aplicada o con textura irregular puede alterar el flujo de aire sobre la superficie del fuselaje, lo que determina un aumento de la resistencia al avance y, por tanto, un mayor consumo de combustible. La densidad y el espesor de la pintura afectan el peso total de la aeronave, ya que cada kilogramo adicional también repercute en un incremento del consumo. Además, la capa de pintura protege contra la corrosión y proporciona resistencia a condiciones extremas, prolongando la vida útil de la estructura y reduciendo los costos de mantenimiento. En lo referente a la seguridad operacional, las pinturas cumplen la función de reducir la interferencia electromagnética y dificultar la detección por radar.

En esta misma línea, y con el fin de profundizar en dichas propiedades, se realizaron estudios experimentales en el laboratorio de la Escuela Militar de Aeronáutica (EMA), en el marco de las asignaturas de Física y Química. A partir de estos trabajos se seleccionaron las propiedades fisicoquímicas más relevantes de las pinturas aeronáuticas, es decir, aquellas que determinan su desempeño frente a condiciones extremas y su interacción con las superficies metálicas del fuselaje.

Entre las propiedades físicas, la viscosidad mide la resistencia al flujo y asegura una aplicación uniforme del recubrimiento; la densidad influye en el rendimiento por litro y en la carga estructural; y la adherencia garantiza la correcta fijación al metal, evitando desprendimientos y la exposición del material base. En cuanto a las propiedades químicas, con la guía de la profesora de Química

Analía Otte, se comprendió que la resistencia química es la tolerancia del recubrimiento frente a combustibles, aceites y otros agentes agresivos, preservando la integridad superficial. A su vez, la resistencia térmica le otorga estabilidad frente a temperaturas extremas, evitando la degradación y el agrietamiento; la resistencia a la abrasión protege contra el desgaste por partículas en vuelo; mientras que la resistencia a la radiación ultravioleta (UV) evita la decoloración y el deterioro prematuro del acabado, manteniendo la funcionalidad y la estética a largo plazo. Asimismo, el tiempo de secado y curado resulta clave para determinar la operatividad en mantenimiento, ya que incide en la rapidez con que el recubrimiento puede volver a servicio. Finalmente, la conductividad eléctrica del recubrimiento permite que la aeronave se comporte como una jaula de Faraday, protegiéndola de descargas eléctricas e interferencias electromagnéticas.

De acuerdo con la Federal Aviation Administration (FAA, 2021) y la European Union Aviation Safety Agency (EASA, 2022), las pinturas aeronáuticas cumplen una función esencial en la protección estructural y durabilidad de las aeronaves, por lo que su certificación requiere ensayos específicos. Entre ellos, el ensayo de resistencia química (Denber Paints & Coatings, 2023) verifica la tolerancia frente a fluidos aeronáuticos; el ensayo de viscosidad (Titania Aero, 2023) asegura una aplicación sin defectos; el ensayo de salinidad (Andrianovate, 2023) reproduce ambientes costeros para medir la resistencia a la corrosión; y el ensayo UV (Titania Aero, 2023) evalúa la estabilidad del recubrimiento ante radiación prolongada. En el campo más avanzado, laboratorios especializados como el Stealth Technology Laboratory (2022) han incorporado evaluaciones relacionadas con la furtividad, mediante pinturas que absorben o dispersan ondas de radar en aeronaves militares. Adicionalmente, estudios de Serway y Jewett (2018) y NASA (2021) señalan que el análisis de conductividad eléctrica determina la capacidad del material para disipar cargas y mejorar la seguridad electromagnética. En conjunto, concluye la EASA (2022), estos ensayos permiten asegurar que el recubrimiento cumpla su doble función: preservar la integridad estructural

y mantener el rendimiento operacional de la aeronave bajo los estándares aeroespaciales más estrictos.

2.1.1 Resistencia a los ambientes salinos

Según Valence Surface Technologies (2024), uno de los factores más agresivos para la degradación de la pintura aeronáutica es la salinidad ambiental. En zonas costeras o ambientes marinos, la presencia de cloruros acelera el proceso de corrosión al favorecer reacciones químicas entre el oxígeno, la humedad y los metales de la estructura. La sal puede penetrar en micro fisuras del recubrimiento, degradando la capa protectora y exponiendo el metal. Esto genera distintos tipos de corrosión, como la galvánica, por picaduras, en grietas y por fricción, que comprometen la integridad estructural de la aeronave. En el experimento realizado se simuló las condiciones de exposición a ambientes salinos que enfrentan los aviones. Para esto se utilizó una caja forrada con papel aluminio, dentro de la cual se creó un ambiente salino en donde se introdujeron placas de aluminio pintadas con pinturas artesanales y pinturas aeronáuticas.

Luego de dos semanas, se realizaron observaciones y se encontraron cambios significativos. La pintura casera perdió totalmente su adherencia al metal y su consistencia. La pintura aeronáutica también se vio afectada, formando pequeños relieves y descascaramiento de la misma. Tomando en cuenta estos resultados, concluimos que en un ambiente salino las pinturas caseras se degradaron más notoriamente, mientras que las aeronáuticas ofrecieron mayor resistencia, confirmando su eficacia en ambientes marinos.

2.1.2 Resistencia a Productos Químicos

Mediante este experimento se analizó la resistencia química de distintas pinturas aplicadas sobre superficies de aluminio, con el objetivo de evaluar su comportamiento frente a productos comúnmente presentes en el entorno aeronáutico, tales como queroseno, nafta, aceite de motor y

jabón. Se compararon dos tipos de pintura, una de aplicación artesanal y otra de fábrica, buscando determinar cuál ofrece mayor durabilidad y protección ante la exposición a diferentes productos químicos.

El procedimiento consistió en aplicar las pinturas sobre muestras de aluminio previamente lijadas y limpias, para luego someterlas a la acción de productos químicos durante 48 horas, bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Tras la exposición, se observaron los efectos producidos en cada muestra, evaluando parámetros como la decoloración, el brillo, la formación de ampollas, el ablandamiento y la pérdida de adherencia. Los resultados mostraron diferencias claras entre ambos recubrimientos, ya que la pintura artesanal presentó daños visibles, especialmente frente a la nafta y el aceite de motor, mientras que la pintura de fábrica permaneció intacta en casi todas las pruebas, salvo una leve deformación presentada con la nafta.

2.1.3 Resistencia a Radiación Ultravioleta.

El ensayo de resistencia a la radiación UV tuvo como objetivo evaluar la adherencia y resistencia de pinturas caseras, automotrices y aeronáuticas sobre aluminio al ser sometidas a luz UV artificial.

La radiación ultravioleta, según la NASA (2021) y Wicks, Jones & Pappas (2007), es una forma de radiación electromagnética que degrada las pinturas al ser absorbida por cromóforos, liberando energía que rompe los enlaces poliméricos, lo que resulta en efectos como la pérdida de color, brillo y fragilización de la película. Esto es especialmente relevante en la aeronáutica, debido a que la alta exposición a la radiación UV puede degradar las pinturas protectoras contra la corrosión.

La hipótesis planteada fue que la degradación se presentaría de forma más intensa en las pinturas caseras con aglutinantes y pigmentos orgánicos que en las formuladas con componentes

minerales. Por su parte, el experimento consistió en exponer muestras de aluminio pintadas con diferentes tipos de pintura (casera, automotriz y aeronáutica) a una lámpara UV durante 10 días. Los resultados confirmaron la hipótesis, la pintura casera mostró una "erupción" o degradación visible al cabo de 5 y 10 días de exposición. Por otro lado, la pintura automotriz y la aeronáutica mantuvieron sus propiedades sin modificaciones durante todo el período de tiempo del estudio. Se llega a la conclusión de que la resistencia de la pintura a la UV depende de sus componentes, comprobando que los recubrimientos industriales, formulados con resinas y pigmentos estables, ofrecen una protección mucho más efectiva que las pinturas de base orgánica.

2.1.4 Resistencia a la Abrasión

Según Valence Surface Technologie (2004), la resistencia a la abrasión de las pinturas es la capacidad de un recubrimiento para soportar el desgaste por fricción o roce continuo sin deteriorarse. Cuanto mayor es esta resistencia, más tiempo la pintura conserva sus propiedades protectoras y estéticas, reduciendo la necesidad de repintado. Esta propiedad fue estudiada a través de un experimento en el cual se lijaron placas de aluminio pintadas con dos pinturas distintas, una artesanal y otra comercial.

El procedimiento consistió en pintar de manera uniforme la superficie plana, una la pintura artesanal y otra con la comercial. Luego, se colocó una lija en el taladro de forma tal que se pueda lograr una figura plana. Seguidamente, utilizando el taladro, se giró la lija para generar el fenómeno de abrasión sobre la superficie pintada y se valoró el desgaste según el tiempo de lijado. El procedimiento se repitió con todas las placas de aluminio pintadas con diferentes pinturas.

Los resultados que se obtuvieron demostraron que las pinturas comerciales tienen más resistencia a la abrasión que la artesanal, y que el desgaste se acrecenta al aumentar el tiempo de lijado. Las conclusiones que se observaron, son que, las pinturas caseras son menos resistentes a la abrasión que las de producción industrial, cuanto menos tiempo esté la pintura expuesta a

condiciones adversas, menos desgaste mostrará, y que además, el desgaste se concentra en las zonas donde la pintura se expone a las condiciones adversas.

2.1.5 Resistencia a los cambios de temperatura

Según Federal Aviation Administration. (2018). *Aviation Maintenance Technician Handbook – Airframe, Volume 1* (FAA-H-8083-31A). U.S. Department of Transportation. Las pinturas están formadas por pigmentos, aglutinantes y solventes, su resistencia depende de la calidad y de la combinación de los mismos. Las pinturas aeronáuticas están diseñadas para soportar condiciones extremas como cambios bruscos de temperatura, radiación solar y fricción, mientras que las caseras carecen de aditivos sintéticos y son menos estables. El experimento realizado permite comparar el desempeño de ambos tipos de pintura frente a condiciones que simulan los entornos exigentes que enfrentan las aeronaves diariamente. Las placas pintadas se expusieron a la luz solar, se sumergieron en agua caliente y agua fría y se les transfirió calor al colocarlas sobre una hornalla eléctrica

Los resultados del experimento demostraron que las pinturas aeronáuticas fueron las más resistentes a los cambios de temperatura, manteniendo su adherencia y sin presentar grumos ni alteraciones superficiales. En contraste, la pintura de pared y la artesanal de aceite de lino conservaron su adherencia, pero mostraron imperfecciones como grumos y burbujas, mientras que la pintura artesanal elaborada con harina de maíz perdió completamente la adherencia y se disolvió al contacto con el agua caliente.

En conclusión, las pinturas aeronáuticas confirmaron su alta calidad y adecuada formulación para resistir condiciones extremas, mientras que las pinturas caseras evidenciaron limitaciones notorias, destacándose ligeramente la de aceite de linaza por su mejor comportamiento dentro del grupo artesanal.

2.1.6 Adherencia

El objetivo del ensayo fue evaluar la adherencia de diferentes tipos de pintura sobre superficies metálicas, determinando su resistencia a la separación respecto del sustrato. Para ello se prepararon cuatro muestras metálicas: dos con preparación previa (lijado y limpieza) y dos sin preparación. Cada una de ellas fue pintada con pintura industrial y pintura artesanal a base de aceite de linaza. Luego del secado, se aplicó el método de corte en trama cruzada y prueba con cinta adhesiva en cinco zonas diferentes de cada placa, con el fin de observar el desprendimiento del recubrimiento.

Los resultados evidenciaron que la pintura artesanal presentó mayor adherencia en todas las condiciones, independientemente de la preparación de la superficie. En cambio, la pintura industrial mostró un desprendimiento mayor durante la prueba. Se concluye que, en este ensayo, la pintura artesanal demostró mejor fijación al sustrato metálico que la pintura industrial, incluso cuando la superficie no había sido preparada, lo que indica una mayor capacidad de anclaje del recubrimiento artesanal frente a la formulación industrial empleada.

2.1.7 Secado

El objetivo del experimento realizado fue descubrir cómo influyen las condiciones ambientales como por ejemplo, la temperatura, la humedad y la presión atmosférica en el tiempo de secado y en la calidad del acabado de distintas pinturas. Para eso, se comparó una pintura industrial con una pintura artesanal, ambas aplicadas sobre placas de aluminio.

La hipótesis que se planteó es que en ambientes más cálidos y con menor humedad, la pintura se seca más rápido y se obtiene un acabado más parejo. Para comprobarlo, se realizaron ensayos con seis placas de aluminio, aplicando pintura artesanal e industrial en tres condiciones distintas: un ambiente cálido, uno húmedo y otro a temperatura ambiente. Durante las pruebas, se

controló el tiempo de secado al tacto y el secado completo con ayuda de un cronómetro y un cotonete.

Los resultados mostraron que las pinturas industriales se secaron más rápido que las artesanales en todas las situaciones. Además, se comprobó que el calor acelera la evaporación de los solventes, reduciendo el tiempo de secado, mientras que la humedad lo enlentece. En general, las pinturas industriales demostraron un secado más eficiente, con mejor terminación y resistencia.

En conclusión, tanto el tipo de pintura como las condiciones del ambiente son factores claves en el proceso de secado. Las pinturas industriales resultaron ser las más adecuadas para el uso aeronáutico, ya que ofrecen un secado más rápido, uniforme y duradero. También se comprobó que trabajar en ambientes cálidos y con poca humedad mejora notablemente el resultado final del recubrimiento.

2.1.8 Conductividad Eléctrica

El objetivo principal del experimento fue determinar si el aluminio pintado con pintura aeronáutica conserva su conductividad eléctrica o si ésta resulta afectada por la aplicación del recubrimiento. El segundo propósito fue comprobar el funcionamiento de una Jaula de Faraday.

El fuselaje metálico de una aeronave, por ser conductor de la electricidad, funciona como una Jaula de Faraday protegiendo el interior de los campos electromagnéticos externos. Es esencial que conserve su conductividad luego de ser pintado para salvaguardar la propia estructura, a los ocupantes y a los sistemas electrónicos de las descargas eléctricas e interferencias electromagnéticas.

En el primer experimento se intercaló una lámina de aluminio pintada con una capa de pintura aeronáutica en un circuito con una fuente de energía, un foco LED y un multímetro para registrar la intensidad de la corriente y observar el encendido del foco.

Para verificar el funcionamiento de la Jaula de Faraday se colocó un teléfono celular dentro de una lata de metal y desde el exterior se realizó una llamada a ese dispositivo.

2.1.9 Viscosidad y densidad

Según el libro, Química de Raymond Chang (2016), la viscosidad es una propiedad física que mide la resistencia de un líquido a fluir, la cual está directamente relacionada con la fricción interna entre sus moléculas. Por otro lado, la densidad representa la cantidad de masa que posee una sustancia en un determinado volumen.

El objetivo de los ensayos realizados fue comparar la viscosidad y la densidad de dos tipos de pintura, convencional y aeronáutica, a los efectos de comprender su comportamiento durante su aplicación. La hipótesis planteada fue que la pintura aeronáutica tendría mayor viscosidad y menor densidad que la pintura convencional, lo que permitiría lograr un acabado más uniforme, la haría más resistente y más eficiente en términos de peso.

Se realizaron dos experimentos, en los cuales se midió la densidad y la viscosidad de cada uno de los tipos de pintura seleccionados.

La medida de la densidad se realizó en base a la determinación experimental de la masa y el volumen de una muestra de pintura, y la medida de la viscosidad se realizó mediante un ensayo en el cual se cronometró el tiempo que tardaba una cantidad fija de pintura en fluir.

Los resultados demostraron que la pintura convencional es más densa y menos viscosa, lo que facilita su aplicación, pero la hace menos adecuada para resistir en condiciones extremas. En cambio, la pintura aeronáutica es menos densa y más viscosa, por lo cual, logra un acabado más resistente y aporta menos peso a la estructura del avión. Esto confirma la hipótesis planteada y resalta la importancia de utilizar recubrimientos especializados en la aviación.

Capítulo 3. Camuflaje

En este apartado se abordarán los aspectos referidos al camuflaje tanto como en uniformes como para aeronaves utilizados en el ámbito militar en los distintos biomas, tales como pradera, selva, bosque, desierto, náutico y urbano. Se crearon diferentes diseños de camuflaje artesanalmente, utilizando el programa informático GeoGebra, con los distintos patrones para los biomas antes mencionados. Los diseños son originales y fueron realizados en equipos de trabajo, los diseños se plotearon utilizando inteligencia artificial en uniformes y aeronaves militares. A continuación, se explicará la definición de camuflaje tomada para este informe, se describirán las funciones matemáticas realizadas en GeoGebra, se expondrán las características más importantes de cada bioma con los respectivos diseños de camuflajes y ploteos en uniformes y aeronaves.

3.1 Concepto de camuflaje

El camuflaje es una estrategia que a un organismo u objeto le permite pasar desapercibido en el entorno. Se logra mediante la imitación de colores, patrones, formas o hasta la inmovilidad. Según Ricardo (2004), el camuflaje militar es una técnica que utiliza colores, patrones y materiales para hacer que las fuerzas militares sean menos visibles para el enemigo, ya sea por ocultación visual (criptismo) o por disimulo (mimetismo). Implica la aplicación de patrones y colores a uniformes, vehículos y equipos para integrarlos con el entorno, dificultando su detección (Tssm, s.f.).

3.2 Funciones matemáticas con GeoGebra

GeoGebra (About GeoGebra, s.f) es un software matemático de carácter dinámico que integra en un mismo entorno herramientas de geometría, álgebra, cálculo y estadística, permitiendo la representación y el análisis simultáneo de conceptos matemáticos en distintos registros. Su diseño interactivo posibilita que cualquier modificación en un objeto repercuta automáticamente en los

demás elementos vinculados, promoviendo la exploración de propiedades y relaciones matemáticas de forma tanto intuitiva como rigurosa.

Este programa, de distribución gratuita y acceso multiplataforma, constituye un recurso didáctico ampliamente utilizado en instituciones educativas a nivel mundial, tanto en la enseñanza como en la investigación.

Con esta herramienta se pueden graficar las funciones seno y coseno, modificar parámetros y superponer curvas hasta obtener figuras que recuerdan a las manchas irregulares del camuflaje. De esta manera, se convierte en un recurso educativo y creativo que vincula la matemática con la vida real. En este caso, se utilizó la vista gráfica de GeoGebra para construir un patrón camuflado, aplicando combinaciones de funciones trigonométricas y colores acordes al bioma seleccionado. El objetivo fue recrear un diseño de camuflaje pensado para cada bioma específico.

La función seno $f: R \rightarrow R, f(x) = a \operatorname{sen}(bx + c) + d$, con a, b, c , y d números reales, permite modificar los parámetros de una onda de la siguiente manera: el valor “ a ” cambia la altura de la onda, “ b ” determina la cantidad de ondas en un periodo, “ c ” corresponde al corrimiento hacia la izquierda o derecha, y “ d ” al desplazamiento hacia arriba o abajo (Stewart, Redlin y Watson, 2007). La función coseno es muy similar, solo varía ordenada en el origen de la onda. Cuando se combinan varias de estas funciones con distintos valores, se generan formas irregulares que evocan las manchas del camuflaje.

3.3 Camuflajes por Bioma

3.3.1 Bosque

Los bosques son uno de los biomas más extensos del planeta, según Bonan (2008) se distribuyen en tres categorías principales: 1) Bosques tropicales: Se localizan en la región ecuatorial (Amazonas, Cuenca del Congo); 2) Bosques templados: Se encuentran en latitudes medias (Europa, América del Norte, partes de Chile y Nueva Zelanda); 3) Bosques boreales (taiga): Forman un cinturón de coníferas en el hemisferio norte (Canadá, Rusia).

La vegetación en los bosques se caracteriza por su estructura de múltiples niveles, resultado de la competencia por la luz solar. Este sistema de capas, en la decisión que realizan por Miller y Spoolman (2018) incluye un dosel superior (techo de los bosques), un estrato medio (ramas más bajas) y un sotobosque (maleza). En cuanto a la flora dominante, según Goudie & Viles (2019) esta varía con el clima, los bosques tropicales tienen alta biodiversidad y árboles de hoja perenne; los templados presentan especies de hoja caduca y coníferas y los boreales (taiga) están dominados por coníferas resistentes al frío.

Continuando con Bonan (2008), el terreno es típicamente fértil debido a la hojarasca y el humus, que enriquecen el suelo y son vitales para la nutrición de las plantas y la retención de agua.

En este bioma el verde es el color dominante, variando en intensidad. (USDA Forest Service, s.f.). En los bosques templados, el otoño trae tonos vibrantes como rojos, naranjas y amarillos por la degradación de la clorofila. El marrón es un color omnipresente, presente en troncos, ramas caídas y el suelo.

Imagen 1 camuflaje realización propia con Geogebra

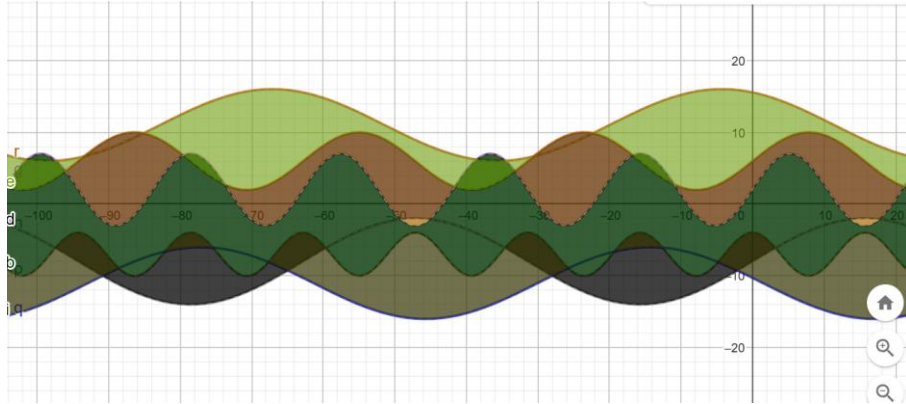


Gráfico de funciones trigonométricas generado en GeoGebra. Recuperado de
<https://www.geogebra.org/classic/uetbc6zq>

Imagen 2 Ploteo en Pilatus PC-21, creación propia con OpenAI



Creación propia con inteligencia artificial. Herramientas utilizadas: Gemini y ChatGPT

(OpenAI). (2025)

Imagen 3 Uniformes militares plateados, hechos con Inteligencia Artificial



Creación propia con inteligencia artificial. Herramientas utilizadas: Gemini y ChatGPT (OpenAI).

(2025).

3.3.2 Desierto

El bioma desértico, según el artículo “Los desiertos explicados” de National Geographic (s.f), es uno de los ambientes más extremos del planeta. Recibe muy pocas precipitaciones (menos de 250 mm al año) y presenta un clima complicado representado por calor intenso durante el día y frío severo por la noche.

El suelo suele ser arenoso o rocoso, con escasa agua y casi sin materia orgánica. Por ello, la vegetación es limitada y presenta adaptaciones notables para sobrevivir: cactus, suculentas y arbustos que almacenan agua en sus tallos, poseen hojas pequeñas o desarrollan raíces profundas que buscan humedad.

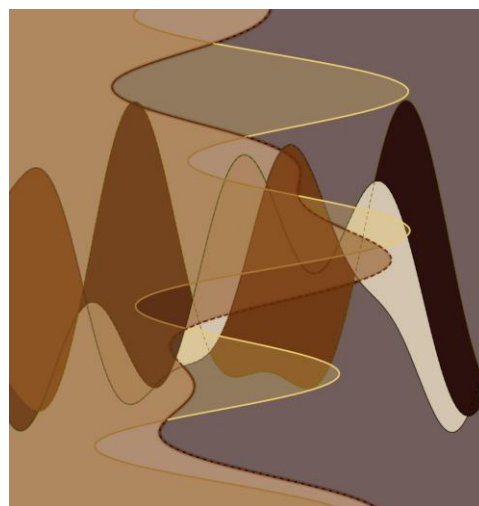
Continuando con el artículo anterior, los animales también han logrado adaptarse. Los camellos, los zorros del desierto, reptiles y pequeños roedores sobreviven en estas condiciones extremas. Muchos son nocturnos para evitar el calor y sus cuerpos están preparados para conservar agua.

El paisaje está modelado principalmente por el viento, que forma dunas y erosiona las rocas. El cielo suele estar despejado y con muy poca humedad. Aunque pueda parecer un lugar vacío, en realidad está lleno de vida especializada, lo que convierte al desierto en un bioma único y fascinante.

La descripción del bioma se puede representar gráficamente mediante la utilización de GeoGebra, como resultado se pueden apreciar las siguientes imágenes.

Imagen 4 camuflaje realización propia con Geogebra

	$f(x) = 2 \sin(1.3x + 0.7) + 0.5 \cos(3.2x - 1.4)$
	$g(x) = -1.5 \sin(0.8x - 2.1) + 1.2 \cos(2.5x + 0.9)$
	$h(x) = 0.9 \sin(2.7x + 1.1) - 2.3 \cos(1.4x - 0.3)$
	$m: x \geq 1.8 \sin(1.2y + 0.5) + 0.7 \cos(3.1y - 1.1)$
	$R1: y > f(x) \wedge y < g(x)$ $= y > 2 \sin(1.3x + 0.7) + 0.5 \cos(3.2x - 1.4) \wedge y < -1.5 \sin(0.8x - 2.1) + 1.2 \cos(2.5x + 0.9)$
	$R2: y > g(x) \wedge y < h(x)$ $= y > -1.5 \sin(0.8x - 2.1) + 1.2 \cos(2.5x + 0.9) \wedge y < 0.9 \sin(2.7x + 1.1) - 2.3 \cos(1.4x - 0.3)$
	$R3: y < f(x) \wedge y > h(x)$ $= y < 2 \sin(1.3x + 0.7) + 0.5 \cos(3.2x - 1.4) \wedge y > 0.9 \sin(2.7x + 1.1) - 2.3 \cos(1.4x - 0.3)$
	$n: x \leq -2 \sin(2.6y + 2.2) + 0.8 \cos(0.7y - 1.5)$
	$a: x < 1.8 \sin(1.2y + 0.5) + 0.7 \cos(3.1y - 1.1)$



Creación propia con inteligencia artificial. Herramientas utilizadas: ChatGPT (OpenAI).
(2025).

Imagen 5 Uniformes militares ploteados, hechos con Inteligencia Artificial



Imagen 2 ploteo en Aermacchi SF-260, creación propia con OpenAI



Creación propia

con inteligencia

artificial. Herramientas utilizadas: ChatGPT (OpenAI). (2025).

3.3.3 Ártico

Según LibreTexts. (s. f.), las zonas árticas conforman uno de los ambientes más extremos y peculiares del planeta. Se encuentran ubicadas en regiones cercanas al círculo polar ártico y además abarcan territorios del norte de Canadá, Alaska, Groenlandia, Escandinavia y Siberia. Un rasgo común que unifica a estos ecosistemas son los inviernos prolongados, temperaturas extremas (-30°) y extensas capas de nieve que cubren el terreno durante la mayor parte del año.

Dentro de estas regiones se encuentran biomas como la tundra y la taiga, los cuales, a pesar de sus diferencias, comparten un paisaje donde predomina el blanco. La tundra, caracterizada por su suelo helado o permafrost, solo permite el crecimiento de musgos, líquenes y arbustos bajos que crecen durante cortos veranos. En contraparte en la tundra se desarrollan grandes bosques de coníferas perennes, cuyas copas verdes son contrastadas con la nieve que las recubre durante casi todo el invierno.

El terreno ártico cubierto por hielo y capas congeladas, se transforma. En verano, el deshielo revela tonalidades marrones y verdes, pero siempre bajo la presencia de la nieve, que regresa con rapidez. Así, el blanco actúa como color dominante del paisaje, símbolo de la dureza climática, pero también del equilibrio ecológico que sostiene a diversas especies de flora y fauna.

En conclusión, las zonas árticas representan un espacio donde la nieve no solo cubre y da forma al terreno, sino que define la identidad visual y ecológica de biomas como la tundra y la taiga. El predominio del blanco recuerda tanto la fragilidad de estos ecosistemas como su papel vital en la regulación del clima global.

Resultado del Gráfico:

Imagen 7 camuflaje realización propia con Geogebra

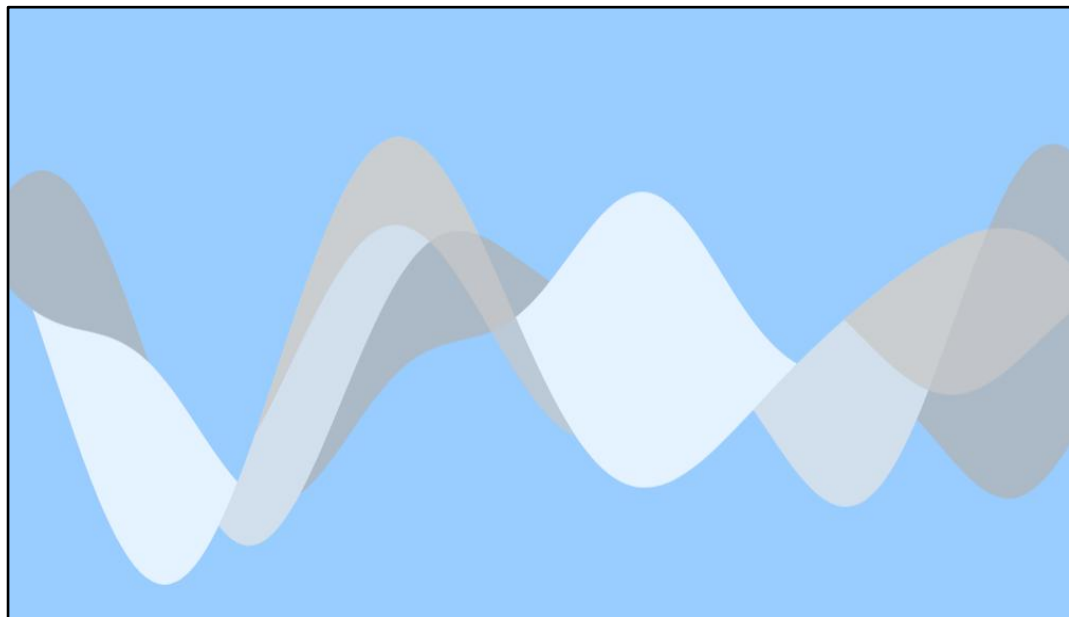
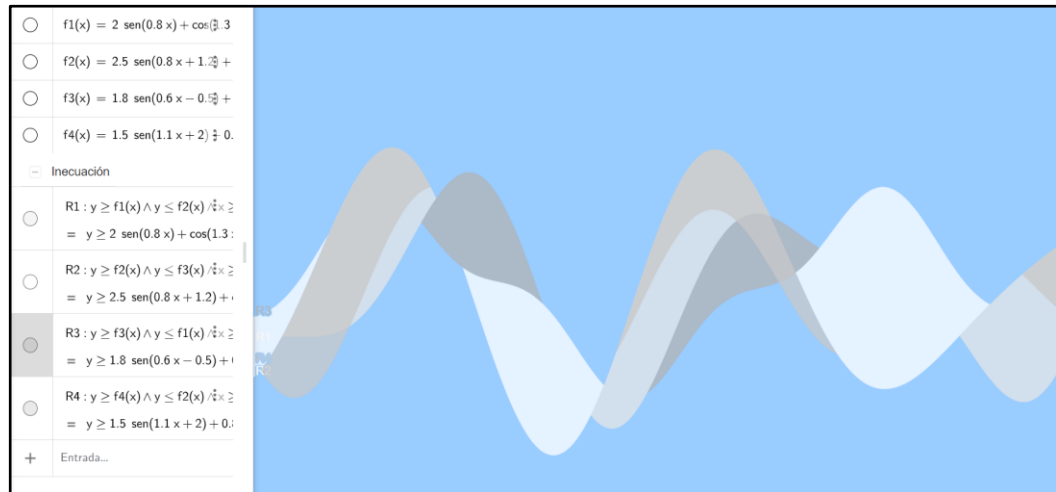


Gráfico de funciones trigonométricas generado en GeoGebra.

También, en base a dicho gráfico, se llevó a cabo el diseño de un Aermacchi SF-260 pintado con el camuflaje ártico.

Imagen 8 ploteo en Aermacchi SF-260, creación propia con OpenAI



3.3.4 Selva

Odum & Barrett (2006) consideran que la selva, también llamada bosque tropical, es un bioma que se caracteriza por tener mucha vegetación, un clima cálido y húmedo durante todo el año y lluvias muy abundantes, que superan los 2.000 mm anuales. Los autores expresan que en la selva hay gran variedad de plantas y animales, y los árboles forman varios niveles o capas, lo que hace que casi no entre la luz al suelo. Los colores que predominan son los verdes y marrones en distintos tonos.

Estas características han sido tomadas en cuenta por la aeronáutica militar, según los Documentos sobre camuflaje en aeronaves militares del Ministerio de Defensa de España (2020),

ya que los aviones que vuelan o están estacionados en zonas selváticas necesitan pasar desapercibidos. Es por esto que se utilizan pinturas de camuflaje con manchas verdes, marrones y negras, que imitan los colores y formas de la selva. De esta forma, los aviones pueden confundirse con el entorno y evitar ser detectados fácilmente desde el aire o desde tierra.

La selva no solo es un bioma muy rico en vida y vegetación, sino que también influye en la estrategia de camuflaje en aviones militares, ya que sus colores y densidad ayudan a ocultar las aeronaves durante las operaciones. El camuflaje de la aeronave Aermacchi T260 fue diseñado por la inteligencia artificial “chat GPT”. Se eligió usar este avión ya que es el que opera en la Escuela Militar de Aeronáutica, capacitando a los futuros pilotos. Se decidió crear

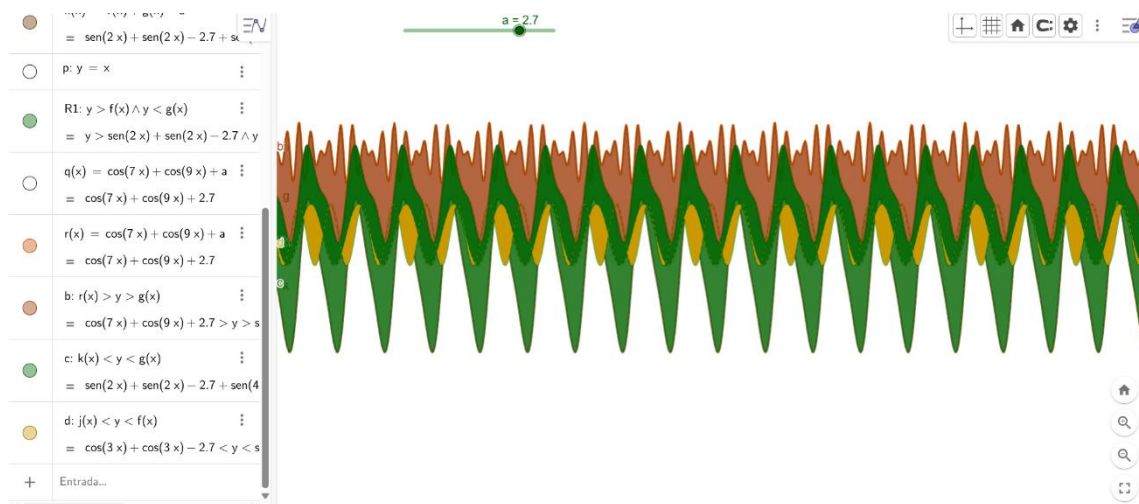
Imagen 9 ploteo en Aermacchi SF-260, creación propia con OpenAI



Imagen 10 Uniformes militares plateados, hechos con Inteligencia Artificial



Imagen 11 camuflaje realización propia con Geogebra



3.3.5 Urbano

El bioma urbano es un sistema que se desarrolla dentro de las áreas urbanas, predominado por la influencia humana en su estructura y funcionamiento.

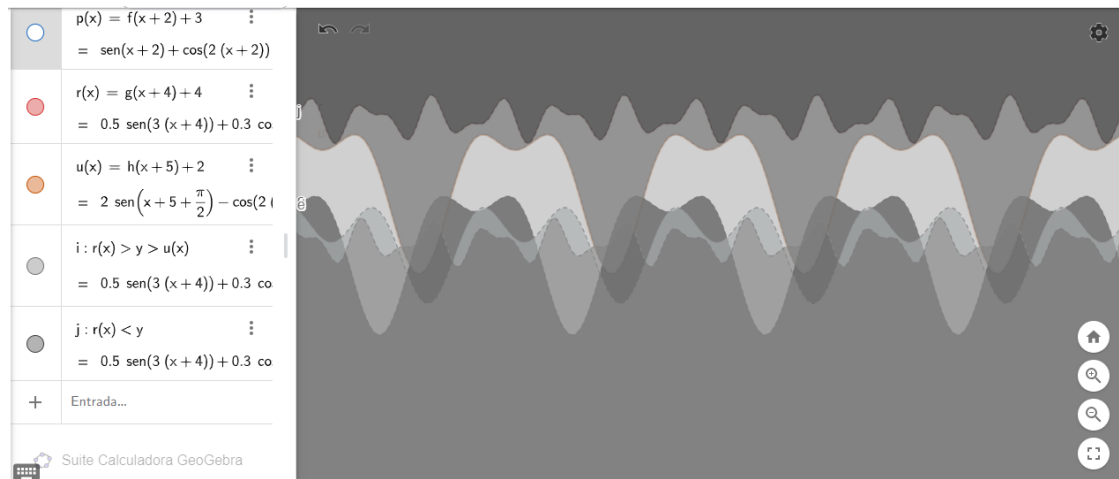
Siguiendo a Tssm (s.f.), El camuflaje urbano se basa en la mezcla de colores neutros como el gris, el negro, el marrón y el blanco. Estos colores son los más comunes en los entornos urbanos y ayudan a romper la silueta del objeto o persona.

Continuando con el autor, el camuflaje urbano se utiliza principalmente en el ámbito militar y policial para operaciones en entornos urbanos y de guerra de guerrillas. Sin embargo, también ha encontrado su lugar en la moda y la ropa deportiva, donde se utiliza para crear un estilo distintivo y funcional. El camuflaje urbano se puede aplicar a vehículos, edificios y otros objetos para ayudarlos a pasar desapercibidos en entornos urbanos. La clave del éxito de este tipo de camuflaje es la adaptabilidad y la capacidad de mezclarse con el entorno sin llamar la atención.

El camuflaje urbano funciona mediante la distorsión de la forma y el mimetismo de los colores. Los patrones y colores utilizados rompen la silueta de la persona u objeto, haciéndola difícil de distinguir del fondo. A diferencia del camuflaje natural, que se basa en la imitación de la naturaleza, el camuflaje urbano se basa en la simulación del caos visual de una ciudad.

Siguiendo estas ideas se generó este camuflaje con geogebra, utilizando las funciones seno y coseno:

Imagen 12 camuflaje realización propia con Geogebra



En base a ese diseño creado en Geogebra, se le pidió a la app de inteligencia artificial “CHATGPT” que aplicará este diseño en el avión Aermacchi T-260

Imagen 13 ploteo en Aermacchi SF-260, creación propia con OpenAI



Y para finalizar también se le pidió que aplicara este diseño en un uniforme militar.



Imagen 14 camuflaje realización propia con Geogebra

Creación propia con inteligencia artificial. Herramientas utilizadas: ChatGPT (OpenAI).

(2025).

3.3.6 Náutico

Según Rojo (s.f.), el camuflaje náutico en aeronaves agrupa esquemas y técnicas de pintura diseñadas para operar sobre el mar o en entornos costeros. Su objetivo principal es dificultar la detección visual y en menor medida fotográfica desde buques, submarinos o aeronaves enemigas, así como confundir la estimación de rumbo, velocidad y actitud.

El autor explica que el camuflaje náutico ha surgido en las primeras décadas inspirado por los patrones dazzle navales de la Primera Guerra Mundial. Durante la Segunda Guerra Mundial, se generalizaron esquemas específicos para patrulla marítima, guerra antisubmarina y búsqueda y rescate (SAR). Fuerzas como Coastal Command (RAF) usaron combinaciones de grises y verde pizarra sobre blanco. Desde la Guerra Fría a la actualidad el camuflaje evolucionó hacia grises de

baja visibilidad y patrones digitales, buscando rendimiento tanto en condiciones diurnas como con sensores electroópticos.

Basado en el Ministerio de Defensa de España (2020), los diseños utilizados en aeronaves militares se basan en principios fundamentales que buscan optimizar el camuflaje y la eficiencia visual, estas son: 1) Disrupción: Bloques, bandas o polígonos que rompen la continuidad de la silueta del avión, dificultando su detección; 2) Contra sombreado: Superficies superiores más oscuras y vientres claros (blanco o gris claro) para reducir el contraste con el brillo del mar y el cielo; 3) Adecuación espectral: Selección de tonos azul gris, verdosos o neutros que armonicen con el entorno marítimo; 4) Mantenimiento y seguridad: Pinturas resistentes a la radiación UV, al salitre y a la erosión; se incluyen marcas de alta visibilidad cuando la seguridad operacional lo exige.

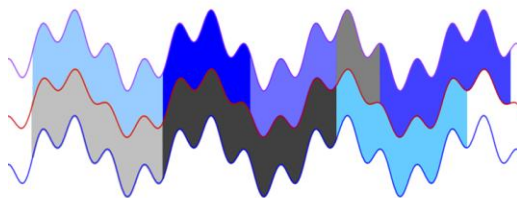
Las siguientes imagenes fueron creadas con Inteligencia Artificial, solicitando a la misma que incluyera el diseño en el Bell P-39 Airacobra, un caza estadounidense utilizado durante la Segunda Guerra Mundial, se eligió dicho avión debido a que estos diseños y colores fueron utilizados en la época de la Segunda Guerra Mundial. Se le pidió además que plasmara el diseño en un pixelado real.

Imagen 15 ploteo en en aeronave y camuflaje, creación propia con OpenAI



A continuación, se detalla el diseño del patrón creado con inteligencia artificial y las fórmulas utilizadas en GeoGebra para pintar el mismo. Las siguientes imágenes son capturas de pantalla del programa GeoGebra.

Imagen 16 camuflaje realización propia con Geogebra



●	$f(x) = \sin(x) + 0.1 \sin(3x) + 0.4 \sin(4x)$	⋮
●	$g(x) = f(x) + 2$	⋮
	$= \sin(x) + 0.1 \sin(3x) + 0.4 \sin(4x) + 2$	
●	$d(x) = \sin(x) + 0.4 \sin(4x) + 0.2 \sin(4x)$	⋮
●	$h(x) = d(x) + 4$	⋮
	$= \sin(x) + 0.4 \sin(4x) + 0.2 \sin(4x) + 4$	
●	$a = \text{IntegralEntre}(g, h, 0, 6)$	⋮
	$= -12.02$	
●	$b = \text{IntegralEntre}(h, g, 6, 10)$	⋮
	$= 8.04$	
●	$c = \text{IntegralEntre}(g, d, 0, 6)$	⋮
	$= 11.98$	

3.3.7 Pradera

La pradera es un terreno caracterizado por terrenos relativamente llanos y cubierto por hierbas, árboles y pastos según Raffino (2023). Destacamos este bioma para realizar el estudio en lo que se refiere a los camuflajes en las aeronaves que es el bioma que más abunda en Uruguay.

Continuando con Raffino (2023), la pradera se caracteriza por encontrarse en zonas templadas, en estas se puede encontrar hierbas, arbustos, matorrales y árboles. Existen dos tipos de praderas, tropicales y templadas, se diferencian por la fauna y flora que se encuentra en cada una. La pradera tiene un suelo rico, por lo que es una de las zonas más explotadas y modificadas por la acción del ser humano a través del cultivo de maíz, soja, trigo, algodón y de la ganadería.

Las praderas tropicales son praderas que se caracterizan por un clima cálido durante todo el año y por tener dos estaciones diferenciadas, una seca y otra más húmeda. Su vegetación suele ser abundante, con hierbas que pueden medir varios metros de altura y una gran presencia de animales. Las sabanas africanas son un ejemplo de praderas tropicales.

Por su parte, las praderas templadas son praderas que presentan precipitaciones, por lo que sus pastizales o hierbas son principalmente gramíneas y no alcanzan gran altura. Estas praderas presentan una gran fluctuación de temperatura, con veranos calurosos e inviernos fríos, y se pueden encontrar en Uruguay.

El camuflaje de pradera se refiere generalmente a patrones de pintura usados en aviones (y especialmente helicópteros) que operan a baja altitud sobre zonas con vegetación herbácea, pastizales o praderas. Este “camuflaje terrestre” busca lograr dos objetivos: 1) Reducir la visibilidad desde el aire; 2) Ocultar la aeronave cuando está en tierra, especialmente en pistas sin pavimentar, plataformas o entornos naturales.

Para el diseño elaborado se usan tonos verdes y marrones, imitando hierba, arbustos o suelo terroso y la parte inferior del avión suele pintarse en tonos más claros (como gris o azul celeste), para reducir la silueta desde abajo.

Por medio de la plataforma Geogebra se pudo realizar el siguiente camuflaje:

Imagen 17 camuflaje realización propia con Geogebra.

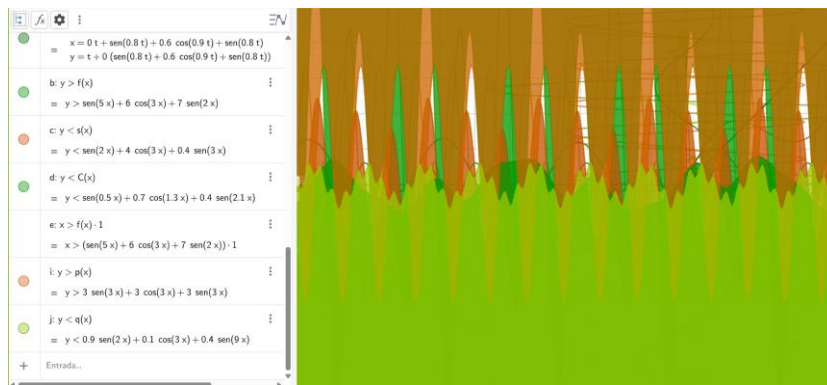
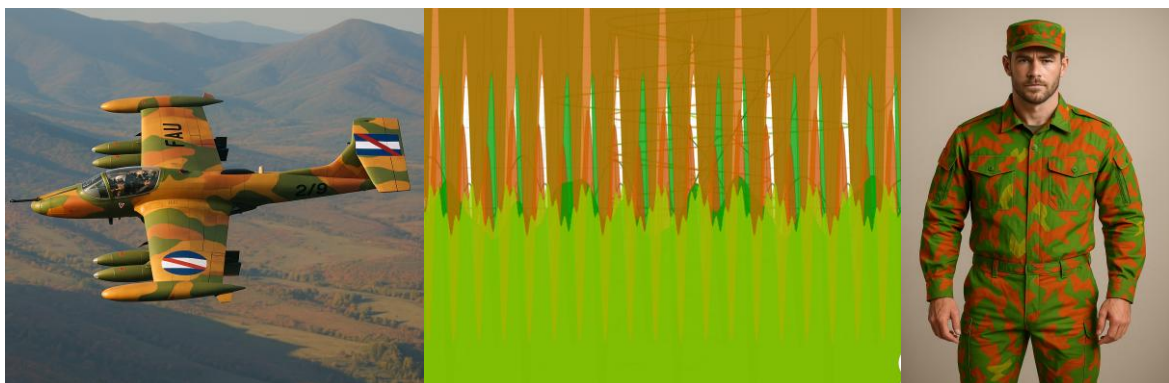


Gráfico de funciones trigonométricas generado en GeoGebra.(2025). Recuperado de

<https://www.geogebra.org/classic/w2vgzmpv>

Imagen 15 ploteo en en aeronave y camuflaje, creación propia con OpenAI



Conclusión

El proyecto de pinturas aeronáuticas de la Generación Odines de la Escuela Militar de Aeronáutica logró su objetivo principal, que fue aprender y entender de forma práctica por qué las aeronaves necesitan pinturas especiales y no pinturas comunes. A través de distintos ensayos pudimos comprobar la importancia de los recubrimientos adecuados para proteger el avión y asegurar su funcionamiento.

Los resultados demostraron que las pinturas aeronáuticas industriales resisten mucho mejor que las pinturas caseras o artesanales. Soportaron mejor la salinidad, los químicos como el queroseno y los aceites, los rayos UV y los cambios bruscos de temperatura. Las pinturas artesanales se degradaron más rápido, aunque la de aceite de linaza tuvo un mejor desempeño dentro de su tipo, especialmente en la adherencia al metal en el ensayo de corte en trama.

También observamos diferencias físicas importantes, como el tiempo de secado y la densidad. Las pinturas industriales secaron más rápido y fueron más livianas, lo cual es clave para no agregar peso extra a la aeronave. Además, en el ensayo de conductividad descubrimos que la pintura aeronáutica aisló el aluminio, lo que impediría la correcta disipación de cargas eléctricas si se aplicara en un fuselaje real, aumentando riesgos para la estructura y los sistemas.

Es importante mencionar que nuestra idea inicial era fabricar un tester de pinturas aeronáuticas como producto final del proyecto. Sin embargo, durante la investigación descubrimos que en Uruguay las aeronaves no se pintan, sino que se envían al exterior para ese proceso. Por lo tanto, fabricar un tester no sería útil en nuestro país, y eso nos llevó a enfocar el trabajo en el análisis técnico y en la comprensión científica más que en la construcción de un dispositivo.

Finalmente, también integramos matemática al proyecto utilizando GeoGebra y funciones trigonométricas para diseñar patrones de camuflaje. En conclusión, esta investigación no solo nos permitió aprender sobre ciencia de materiales, sino también comprender por qué es fundamental usar pinturas especializadas para la protección y el mantenimiento de las aeronaves dentro de la Fuerza Aérea Uruguay.

Bibliografía

About GeoGebra. (s. f.). GeoGebra. <https://www.geogebra.org/about>

Apuntes de clase de Física y Química. (2025). Material proporcionado por el docente.

Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449.
<https://doi.org/10.1126/science.1155121>

Federal Aviation Administration (FAA). (s. f.). Acceptable methods, techniques, and practices – Aircraft inspection and repair (Advisory Circular 43.13-1B).

Goudie, A. S., & Viles, H. A. (2019). *The Earth's biomes: An introduction to global ecology*. Wiley-Blackwell.

LibreTexts. (s. f.). Arctic tundra. En *Botany* (Ha, Morrow y Algiers) – Ecology and Conservation. Recuperado de <https://bio.libretexts.org>

Miller, G. T., & Spoolman, S. E. (2018). *Living in the environment*. Cengage Learning.

Ministerio de Defensa de España. (2020). *Técnicas de camuflaje y mimetismo en aeronaves militares*. Ministerio de Defensa.

NASA. (2021). *NASA Coatings and Corrosion Handbook*. National Aeronautics and Space Administration.

National Geographic. (s. f.). Deserts, explained. National Geographic.
<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/deserts>

Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2006). Fundamentos de ecología (5.^a ed.). Cengage Learning.

OpenAI. (2025). Imagen generada de un avión Aermacchi SF-260 camuflado mediante inteligencia artificial. Asistente de IA DALL·E de OpenAI.

Raffino, E., & Equipo editorial Etecé. (2023, 20 de noviembre). Pradera. Enciclopedia Concepto. Recuperado el 27 de agosto de 2025, de <https://concepto.de/pradera/>

Rojo, Á. (s. f.). La evolución del camuflaje en la aviación militar. Pucará Defensa. Recuperado el 1 de septiembre de 2025, de <https://www.pucara.org/post/la-evoluci%C3%B3n-del-camuflaje-en-la-aviaci%C3%B3n-militar>

Stewart, J., Redlin, L., & Watson, S. (2007). Precalculo: Matemáticas para el cálculo. Cengage Learning Editores S.A. de C.V.

Tssm. (s. f.). Tipos de camuflaje militar: Usos y equipo recomendado. Recuperado el 18 de agosto de 2025, de <https://www.tssm.es/blog/consejos-y-trucos/tipos-de-camuflaje-militar>

USDA Forest Service. (s. f.). Science of fall colors. U.S. Department of Agriculture. <https://www.fs.usda.gov/visit/fall-colors/science-of-fall-colors>

Valence Surface Technologies. (2024, 17 de octubre). Aircraft corrosion prevention: Ensuring safety and airworthiness. Recuperado de <https://www.valencesurfacetech.com/the-news/aircraft-corrosion-prevention/>

Federal Aviation Administration. (2018). *Aviation Maintenance Technician Handbook – Airframe, Volume 1* (FAA-H-8083-31A). U.S. Department of Transportation

https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation

Wicks, Jones & Pappas (2007) .

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1739672>