Universidad Autónoma Metropolitana
Casa abierta al tiempo Azcapotzalco

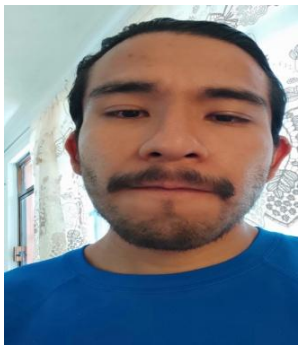
Licenciatura en Ingeniería Mecánica

Nombre del proyecto:

Exploración de la biomecánica de los árboles mediante el análisis de sus características dendrométricas, su estructura y sus cargas mecánicas

Modalidad: Proyecto de investigación
Versión: Primera
Trimestre lectivo: 21O

Datos del alumno:
Nombre: Marco Octavio Mendieta Arroyo
Matricula: 2143031987
Correo electrónico: al2143031987@azc.uam.mx
Firma:



Datos del asesor
Nombre: Héctor Javier Vázquez
N° Económico 3830
Categoría: Titular
Nivel académico: Doctorado
Departamento de adscripción: Sistemas
Teléfono: 5534093923
Correo electrónico: hvj@azc.uam.mx
Firma:

Fecha: Alcaldía Azcapotzalco, CDMX., a 14 de Enero del 2022

Declaratoria

En caso de que el Comité de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica apruebe la realización de la presente propuesta, otorgamos nuestra autorización para su publicación en la página de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

Marco Octavio Mendieta Arroyo	Héctor Javier Vázquez

Introducción

La biomecánica es la ciencia que estudia las fuerzas y movimientos de los organismos vivos, es decir, es la disciplina que estudia los fenómenos mecánicos y cinemáticos en los seres que tienen vida. En el caso de las plantas, la biomecánica puede definirse como el estudio de las estructuras y funciones de los sistemas biológicos haciendo uso de los conceptos y métodos de la mecánica.

Los árboles se encuentran entre los seres vivos más antiguos del planeta, pero son estáticos, por ende, tienen que soportar todo tipo de fuerzas intrínsecas y extrínsecas. Los árboles están expuestos a muy diversas tensiones. Por ejemplo, un árbol solitario o aislado ramificado desde la base tiene más carga estática durante una gran corriente de aire. Las hojas y las ramas que se encuentran en los troncos amortiguan la amplitud de oscilación mientras que los árboles con tallos delgados y copas pequeñas están más expuestos a los balanceos, por lo que aumenta el riesgo de caída. En la práctica, un mal mantenimiento puede ocasionar la fractura del tronco o llegar hasta la caída de este.

Una tarea clave es comprender cómo los árboles responden a cargas mecánicas y/o condiciones ambientales dependiendo de la zona en la que estos se encuentren. La forma del árbol parece influir en su respuesta dinámica ante los vientos y las propiedades de sus materiales influyen en su resistencia y elasticidad.

La estática de los árboles estudia las cargas y tensiones que se ejercen intrínseca y extrínsecamente en el árbol y por ende permite evaluar el riesgo de caída o ruptura del tronco. Su resistencia a la caída se relaciona con el potencial de anclaje del sistema radicular, el cual puede ser superficial o profundo. Los árboles soportan las cargas de los vientos, la nieve, el hielo, así como su propio peso. Cuanto más alto sea el árbol, mayor es el efecto vela, más cargas se desarrollarán durante una tormenta y estas a su vez ejercerán tensión directa al tronco. A medida que el tronco se balancea, sus fibras periféricas extienden el lado de tensión y acortan el de compresión. [1]

La presente propuesta propone hacer una exploración de las fuerzas y cargas que actúan sobre los árboles y en base a esto estimar el equilibrio y los esfuerzos para mantenerse erguidos. La tensión ejercida por los propios tejidos leñosos de los troncos del árbol, el peso de las hojas y la disponibilidad de luz solar son factores que afectan el crecimiento de un árbol. Sin embargo, también influye la forma de estos y su estructura, las reacciones ejercidas en las ramas provocada por la carga del viento, entre otras cosas.

Para hacer una estimación de su estabilidad se propone obtener un diagrama de cuerpo libre y consideramos todas las cargas a las que un árbol está sujeto. Éstos se caracterizan por una distribución homogénea de tensiones en la superficie del árbol, por lo cual, el centro de gravedad está en la raíz. Para elaborar el diagrama de cuerpo libre se debe empezar por tomar en cuenta que las ramas que tiene cada tronco trabajan como tensiones, además de cada carga extra que llegase a tener y a partir de aquí, se va a definir un índice de estabilidad del árbol. Para evaluar su estabilidad también se incluirán características dendrométricas como: la altura del árbol, el diámetro del tronco o de los troncos primarios, longitud de ramas primarias, los ángulos entre los troncos primarios (Y), presencia de plantas parásitos, la presencia de heridas, la densidad del follaje, la morfología del árbol (simetría, forma, ramificación uniforme o aleatoria) y la densidad de la madera. Para el trabajo de campo se pretende estudiar el arbolado urbano de la Unidad.

Este estudio no-destructivo se realizará sobre aproximadamente 20 a 30 especies (representadas por aproximadamente 80 árboles).

Antecedentes

En el año de 1998, el doctor Lothar Wessolly y el doctor Martin Erb publicaron: "El catálogo de Stuttgart de dureza de la madera", en donde estudiaron y determinaron las compresiones y resistencias al corte o cizallamiento en madera verde, en diferentes secciones anatómicas, donde las propiedades varían desde 1.4 $\frac{kN}{cm^2}$ a 2.8 $\frac{kN}{cm^2}$. Dicho catalogo se creó con el fin de determinar y estudiar las propiedades de la madera verde, ya que esta no es muy relevante para el sector industrial. [2].

En el año 2004, el doctor Claus Mattheck, profesor investigador del Instituto Tecnológico de Karlsruhe, ubicado en la ciudad de Karlsruhe, Alemania, publicó el libro "El rostro del fracaso en la naturaleza y la ingeniería", que describe a los árboles como estructuras autooptimizables y que una estructura óptima tiene una tensión uniforme sobre toda su superficie. Durante tres décadas se ha dedicado a la investigación de árboles y su relación con la biomecánica. Como resultado de su trabajo publicó diversos libros, numerosos artículos de información y difundió sus conocimientos en videos. [3].

En el año 2006, la doctora Heli M. Peltola, investigadora de la Universidad del este de Finlandia, detalló en el periódico americano de botánica: "Estabilidad mecánica de árboles bajo cargas estáticas", que la estabilidad en especies de forma monopodial no necesariamente se da por pruebas estáticas y el modo de falla mecánica parece depender de la edad del árbol, además la simulación de cargas estáticas no es suficiente para explicar por sí sola la estabilidad mecánica de los árboles en los vientos, aunque estos experimentos con árboles de tamaño real son útiles en la investigación de la estabilidad. [4].

En el año 2010; la ingeniera en construcciones Haydeé Noceti, la licenciada en administración Susana Ibáñez y la licenciada en química Sol Avancini Noceti, publicaron el libro: "La estática en la vida cotidiana", que habla sobre cómo se introduce dicha rama de la mecánica en la vida cotidiana a partir de situaciones y problemáticas reales, además de cómo están presentes los principios y las leyes de la estática en el universo donde vivimos. [5].

En el año 2012, la doctora Alicia Chacalo Hilu, profesora e investigadora por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), publicó un artículo para la Revista Mexicana de Ciencias Forestales, el cual lleva por nombre: "Identificación de daños en arbolados en parques del Distrito Federal", dicho artículo menciona que los árboles pierden estabilidad y sufren daños muchas veces por vandalismo y un mal mantenimiento, esto a su vez genera infecciones, hongos y heridas principalmente en la parte del tronco. [6].

En el año 2018, la investigadora Amanda Bunce, investigadora asistente en la Universidad de Connecticut, publicó la investigación: "Biomecánica 101: Las propiedades dinámicas de los árboles", que habla de cómo reaccionan los árboles a fuerzas externas, como el viento, además detalla las estructuras de los árboles y sus movimientos, y como éstos tienen una respuesta inmediata a la fuerza del viento donde este se expresa como un movimiento circular periódico. [7].

Justificación

Los árboles son los seres vivos más grandes y pesados que han poblado la Tierra. Para conseguir su estabilidad, cuentan con un material estructural que es la madera. La madera está formada principalmente por un polisacárido llamado celulosa y por lignina (un polímero complejo formado por ácidos orgánicos y alcoholes fenilpropílicos).

La biomecánica de los árboles cubre investigaciones sobre nuevos conocimientos de cómo éstos soportan las cargas mecánicas y resisten las fallas, especialmente cuando ocurren vientos. Los estudios biomecánicos utilizan métodos estructurales (dinámicos y estáticos), éstos señalan que la forma estructural del árbol influye en la respuesta dinámica ante los vientos y las diferencias en la morfología del árbol pueden producir comportamientos extremos, como una disipación muy pequeña o casi nula en las oscilaciones del tallo (tronco). El estrés y la tensión en el crecimiento de los árboles es actualmente una cuestión de investigación importante ya que indica como la tensión puede ser un factor, más importante que el estrés, en la respuesta de crecimiento adaptativo. En cuanto a la altura, entre más altura tenga el árbol, las ramas serán más largas y las velocidad del viento mayor, pero habrá más dificultades para subir el agua desde las raíces del árbol. La forma de los árboles también influye en su carga de viento sobre las ramas, especialmente los vientos actúan como osciladores acoplados unidos a un tronco para modificar el comportamiento de balanceo. Otro aspecto ligado a la biomecánica es la importancia de la luz solar y del agua para los árboles, ya que son la fuente primaria de energía necesaria para su vida, crecimiento y reproducción. De esta forma, los árboles están en competencia permanente entre ellos y con otras plantas por esos recursos.

Los estudios de biomecánica de los árboles son importantes tanto para los árboles urbanos como para los árboles en los bosques, pues ayudan a mantener con vida este ser, no sólo para beneficiarse de su madera, sino para mantenerlo con vida por los importantes beneficios que estos ofrecen al ambiente. Algunos de estos beneficios son: purificación el aire y generación de oxigeno, controlan la temperatura del ambiente, dan sombra y protegen contra rayos UV, algunas especies sirven como alimento y además son el hogar de numerosas especies (animales, insectos, hongos, bacterias). Este estudio es importante considerando la problemática del arbolado de la ciudad de México [8].

Objetivos

Objetivo General

Analizar las cargas mecánicas en árboles que afectan la estabilidad de su estructura

Objetivos Particulares

- Seleccionar especies de árboles
- Realizar mediciones mediciones y evaluaciones no-destructivas del árbol que se tomarán en cuenta para el índice de estabilidad
- Recolectar la información que se empleo durante la etapa de mediciones
- Elaborar un índice de estabilidad
- Diseñar y elaborar modelos de árboles en AUTOCAD para un análisis
- Analizar todas las cargas mecánicas presentes en la estabilidad de un árbol
- Evaluar los resultados y presentar conclusiones

Descripción técnica

Como ya se mencionó, en este documento, se explorará la biomecánica de árboles. Se seleccionarán alrededor de 20 a 30 especies, enfatizando en grupos donde el análisis requiere una menor complejidad hasta llegar a una mayor. La complejidad se examinará a partir del tronco o eje principal, distinguiendo el crecimiento uniforme y sin tantas alteraciones en las ramas, donde a medida que aumenta la altura las cargas mecánicas serán equivalentes a largo del árbol, un claro ejemplo es el pino. Se propone elaborar un índice de estabilidad, para realizar dicho índice es necesario partir desde un análisis mecánico que involucra un diagrama de cuerpo libre donde se representarán todas las fuerzas que actúan en el árbol. Para la parte de trabajo de campo se partirá desde mediciones y observaciones como son: directa, indirecta, cuantitativa y cualitativa, ya que las distintas valoraciones son necesarias para la evaluación de la estabilidad. Se presentarán los resultados mediante una tabla comparativa entre diferentes especies y diseños de árboles en donde se analizarán cargas mecánicas expuestas utilizando AUTOCAD, cabe definir que el diseño será para un máximo de 10 árboles distintos representativos.

El sistema que se propone estará formado por **4** módulos principales, en la figura 1 se muestra el diagrama de bloques correspondiente.

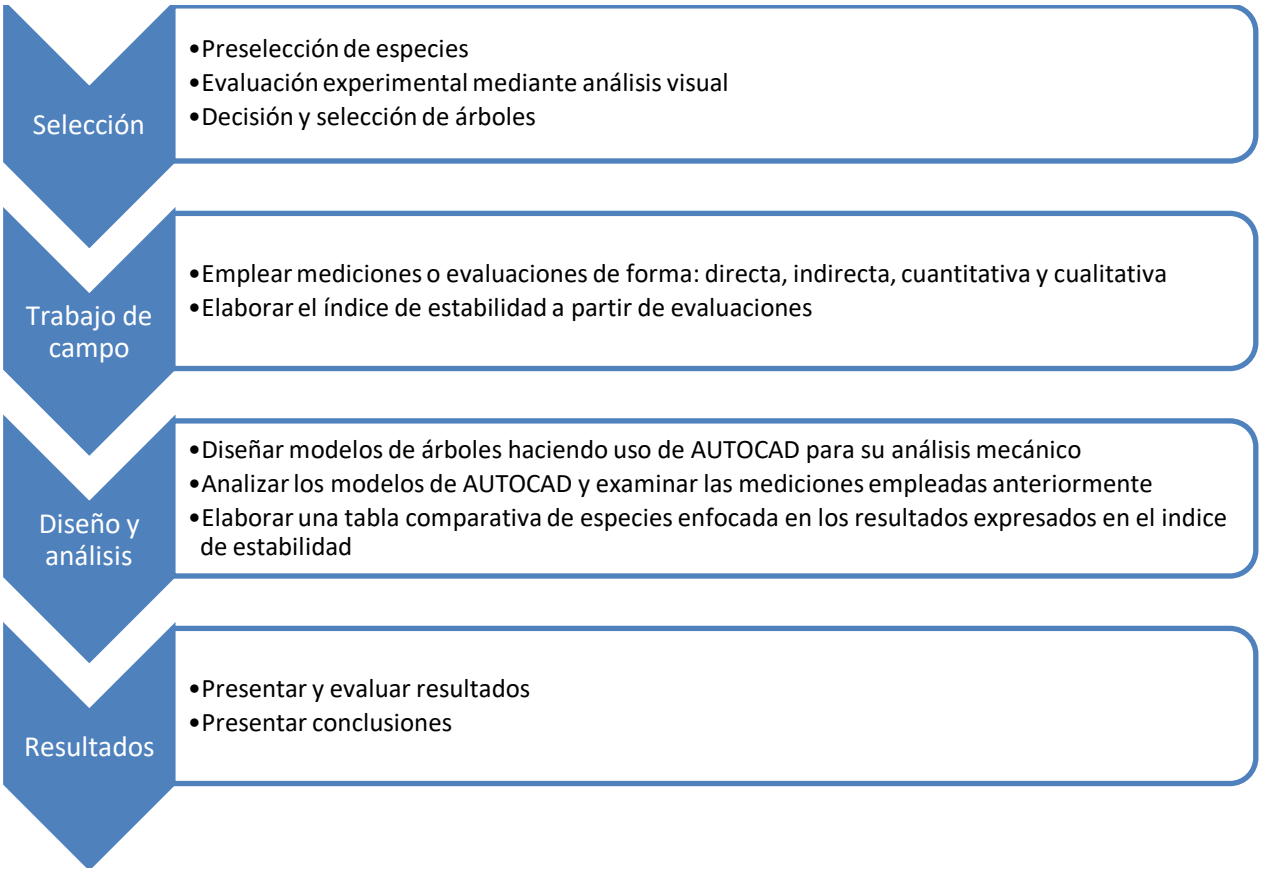


Figura 1. Diagrama de bloques de la descripción técnica

Selección

En este bloque se divide en tres partes, donde el principal objetivo consiste en la selección de 20 a 30 especies de árboles. Los tres sub-bloques son:

- ***Preselección***: En esta parte del proyecto se realizará una selección de árboles de diferentes especies.
- ***Evaluación experimental***: Mediante un análisis experimental-visual se determinarán todos los factores que pueden interferir en la estabilidad de los árboles, imaginando líneas de carga en un árbol solitario.
- ***Decisión y selección***: En base al punto anterior se tomará la decisión de selección de especies a trabajar en el proyecto, alrededor de 20 a 30 especies.

Mediciones de campo

Este bloque se divide en dos partes: primero, el trabajo de campo consiste en realizar mediciones y observaciones no-destructivas, y después elaborar un índice de estabilidad. En la parte de trabajo de campo se emplearán mediciones con distintos métodos y elegir aquellas con menor incertidumbre. Cabe resaltar que estas mediciones se basan en trabajos publicados [9]. Posteriormente, con la información obtenida en las mediciones se creará un índice de estabilidad, partiendo desde un diagrama de cuerpo libre y examinando e identificando cargas mecánicas como tensiones, esfuerzos y fuerzas aplicadas a las que se encuentra sujeto un árbol, tomando en cuenta que el centro de gravedad está en la raíz y cada rama trabaja como tensión. Dichos bloques son:

- ***Trabajo de campo***: Las informaciones (mediciones y observaciones no-destructivas) que se tomarán en cuenta son: la altura del árbol, el diámetro del tronco, diámetro de la copa, altura de la copa, ángulo entre el tronco y la perpendicular al suelo que sale del centro del tronco, raíces visibles o no, orientación de las raíces, nivel de compactación del suelo, diámetro y longitud y orientación de los troncos primarios, los ángulos entre los troncos primarios (Y), presencia de plantas parásitos, la presencia de heridas, la densidad del follaje, la morfología del árbol (simetría, forma, ramificación uniforme o aleatoria) y la densidad de la madera. Para la parte de altura del árbol se emplearán distintos métodos con la finalidad de comparar cuál de estos posee una mayor precisión, tales métodos serán: mediante fotografías, mediante el teorema de Tales (usando el reflejo de sombras y triángulos semejantes) y mediante escalas. Para la organización de la información se realizará una hoja, tipo cuestionario, para facilitar la captura de datos. Se tomaran fotos de cada árbol, con referencia: árbol completo, foto de la ramificación desde abajo del árbol, fotos de fracturas, heridas, presencia de enfermedades y sub-troncos.
- ***Elaborar un índice de estabilidad***: Para elaborar el índice de estabilidad se partirá desde el punto de vista mecánico en donde se realizarán diagramas de cuerpo libre, con estos esquemas se identificarán cargas mecánicas a las que se encuentra sujeto un árbol y considerando las mediciones dendrométricas. Se entiende por índice de estabilidad una valoración o un dictamen que en base a las mediciones y observaciones anteriores permita valorar y/o comparar la estabilidad entre de un árbol y decidir el riesgo de caída de este. Se intentará construir un índice cuantitativo de tipo puntaje. Para esto se realizará un análisis estadístico de los datos con el fin de determinar el impacto de las diferentes mediciones e

intentar obtener un índice aditivo, multiplicativo o mixto que integre el máximo de información.

Diseño y análisis

Este bloque se divide en tres partes, donde la finalidad consiste en el análisis de las especies seleccionadas anteriormente, mediante diseños de modelos de árboles, estos se analizarán de forma gráfica haciendo uso de AUTOCAD. Dicho análisis será para un máximo de 10 árboles representativos. Además, se planteará y elaborará una tabla comparativa de cada especie con la que se trabajo, esta tabla expresará los resultados adquiridos que intervienen en la estabilidad de un árbol.

- ***Diseño de modelos***: El diseño se empleará en AUTOCAD para un 10 de árboles, en donde se analizarán todas las cargas mecánicas presentes.
- ***Elaborar una tabla comparativa***: Se elaborará una tabla que refleje toda la información adquirida durante el trabajo de campo, contendrá todo lo que afecta e interviene en la estabilidad de un árbol.
- ***Analizar***: En esta parte se examinarán todas las cargas presentes que intervienen en la estabilidad estructural de un árbol.

Resultados

Esta etapa del proyecto estará conformada por dos sub-bloques, en donde se presentarán y evaluarán los resultados y se entregarán las conclusiones del proyecto, dichos sub-módulos son:

- ***Presentar y evaluar resultados***: Se presentarán los resultados obtenidos, además de justificarlos con conceptos que nos proporciona la mecánica y la biomecánica de plantas.
- ***Presentar conclusiones***: Se entregarán las conclusiones del proyecto.

Diagrama de actividades

Actividad	Semana											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Preseleccionar especies de árboles												
2. Evaluación experimental-visual para selección de especies												
3. Seleccionar los árboles por especie												
4. Realizar mediciones y evaluaciones en los árboles, además de fotografías de las especies												
5. Elaborar un índice de estabilidad, considerando las mediciones anteriores y el uso de la mecánica estructural												
6. Recolectar la información obtenida												
7. Diseñar y realizar modelos de árboles en AUTOCAD y una tabla comparativa de especies												
8. Analizar los modelos diseñados en AUTOCAD para un análisis de cargas mecánicas												
9. Presentar resultados y presentar conclusiones												
10. Redactar reporte												

Normatividad

Se utilizará la norma ANSI A300, que establece una evaluación en la cual se encuentran los riesgos de una falla estructural en el árbol mediante un mal uso de mantenimiento. [10].

Entregables

Listado de elementos a entregar al finalizar el proyecto propuesto:

- Archivo en Excel con las mediciones, observaciones y fotos de cada árbol estudiado.
- Metodología usada para la elaboración del Índice de estabilidad para árboles.
- Entrega de los diseños de árboles, representando todas las cargas mecánicas presentes en este, se utilizará y entregará mediante software de diseño AUTOCAD.
- Tabla comparativa elaborada en Excel de diferentes especies de árboles, en donde se enfatizará todas las cargas presentes y el riesgo en la estabilidad.

Referencias bibliográficas

[1] Moore J. R., & Maguire, D. A., 2004, Naturals way frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. Trees - Structure and Function, 1 ed, Springer, Toronto.

[2] Wessolly L., Erb M., 1998, Catalogo de Stuttgart de dureza en estática de árboles e inspección de árboles, Patzer, Alemania.

[3] Mattheck Claus., The face of failure in nature and engineering, 2004, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.

[4] Peltola HM., 2006, Estabilidad de árboles bajo cargas mecánicas, Jornada Americana de Botánica, Palermo.

[5] Noceti H., Ibáñez S., Avancini S., 2010, La estática en la vida cotidiana, Las ciencias naturales y las matemáticas, Buenos Aires, Argentina.

[6] Chacalo Hilu Alicia, 2012, Identificación de daños en arbolados en parques del Distrito Federal, 1ed, Revista Mexicana de Ciencias Forestales, Azcapotzalco, D.F.

[7] Bunce Amanda, 2018, Biomecánica 101: Las propiedades dinámicas de los árboles, tesis de doctorado, Ciencias Biológicas, Universidad de Connecticut.

[8] Vázquez H.J., Grabinsky J., Chacalo A. y Aldama A., 2005, "Inventario de arbolado urbano de la Delegación Azcapotzalco", Órgano informativo de Asociación Mexicana de Arboricultura, 7(13), pp. 25-29.

[9] Costello Larry, 2000, "Inspecciones desde el suelo: un medio para reducir riesgos en el bosque urbano", Órgano informativo de Asociación Mexicana de Arboricultura, 3(3), pp. 13-19.

[10] ANSI, 2011. "Manejo de árboles, arbustos y plantas - Prácticas estándar", ANSI A300.

Terminología

- Dendrometría: La Dendrometría trata de la medida de las dimensiones del árbol, del estudio de su forma y en su caso una estimación de su masa o de su volumen
- Biomecánica: La biomecánica es el estudio de la estructura, función y movimiento de los aspectos mecánicos de los sistemas biológicos, utilizando los métodos de la mecánica.
- Sistema reticular: Conjunto de raíces de una misma planta. Según su origen y desarrollo se distinguen dos tipos de sistemas: profundo y superficial.
- Efecto vela: Cuando un tronco se encuentra en vaivén debido a las fuertes rachas de viento.
- Monopodial: Es aquella que se compone de un eje principal en cuya zona apical perdura el crecimiento vegetativo y a cuyos lados crecen ramas secundarias.

Infraestructura

No se requiere, sólo permiso para trabajar en las áreas verdes de la Universidad Autónoma Metropolitana de la Unidad Azcapotzalco. En principio se trabajará con los árboles de la unidad, sin embargo, en caso de no ser posible, debido a la pandemia, se trabajará en un área verde pública como la Alameda Central o los Viveros de Coyoacán. En caso de ser aceptado este proyecto quizás sea necesario informar a las autoridades correspondientes de la unidad el desarrollo de este proyecto.

Asesoría complementaria

No es necesaria

Publicación o difusión de los resultados

Se tratará de publicar después de terminado, pero no es una condición para terminar este proyecto.