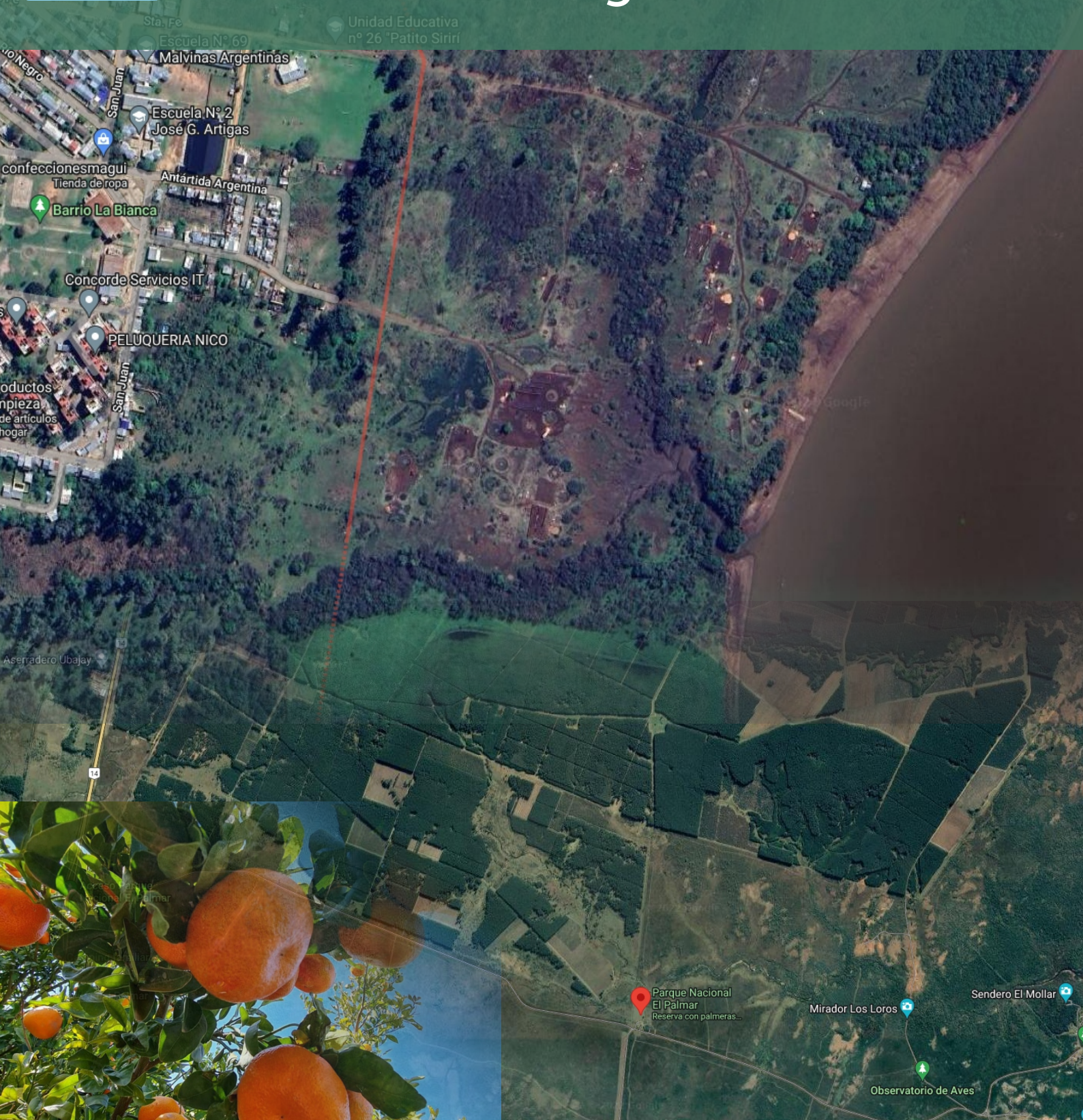




Actas de las segundas Jornadas de doctorandos de la Facultad Regional Concordia



**Actas de las segundas Jornadas
de doctorandos de la
Facultad Regional Concordia**

Germán Scattone.

Bruno Bignotti.

Mario R. Chury.

Alberto Palacio.

Miqueas C. Denardi.

Lucas C. Bessone Martínez.

Actas de la Segunda Jornada de Doctorandos de la Facultad Regional Concordia /
Alberto José Palacio ... [et al.] ; compilación de Natalia Tesón ; editado por
Fernando Cejas. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2022.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-4998-99-6

1. Energía. 2. Hormigón. 3. Citricultura. I. Palacio, Alberto José. II. Tesón, Natalia, comp. III.
Cejas, Fernando, ed.
CDD 620.007

Edición y Diseño: Fernando Cejas



Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Rubén Soro

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

Secretaria Cultura y Extensión Universitaria: Ing. Federico Olivo Aneiros

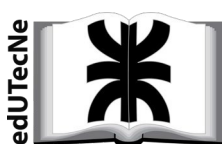


Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Concordia

Decano: Ing. José Jorge Penco

Vicedecano: Ing. Marcos Roberto Blanc

Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado: Dra. Natalia Tesón



edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General a cargo: Fernando Cejas

Dirección General: Mg. Claudio Véliz

Dirección de Cultura y Comunicación: Ing. Pablo Lassave

Queda hecho el depósito que marca la Ley N° 11.723

© edUTecNe, 2022

Sarmiento 440, Piso 6

(C1041AAJ) Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina



Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

ISBN 978-987-4998-99-6



Estudio del crecimiento de árboles de mandarina
Nadorcott en Entre Ríos.

Ing. Agr. Mg. Germán Scattone.

1

Modelo de Distribución Resistivo del Subsuelo y sus
Aplicaciones en Ingeniería Geológica, Cuenca del Arroyo
Palmar, Entre Ríos.

Ing. Eléctr. Mario R. Chury.

20

Hormigón liviano autocompactado de alta resistencia
reforzado con fibras de acero. Análisis como material de
refuerzo en vigas.

Ing. Civil Alberto Palacio.

37

Modelo numérico para el hormigón reforzado con fibras
híbridas: Aplicación a un caso de estudio.

Ing. Civil Miqueas C. Denardi.

45

Modelos numéricos en GPGPU para el tratamiento de
fondos móviles erosionables.

Ing. Civil Lucas C. Bessone Martínez.

55

Desarrollo de tecnologías inteligentes para la eficiencia
energética y la integración de recursos de generación
distribuidos al sistema de potencia.

Ing. Eléctr. Bruno Bignotti.

60



Estudio de crecimiento de árboles de mandarina Nadorcott en Entre Ríos

Doctorando: German A. Scattone

UTN Facultad Regional Concordia

gscatone71@gmail.com

Director: Dr. Miguel Luis Ragone

Codirector: Dr. Roberto Alfredo Varela

Resumen: La relación volumen de copa, y la ocupación del espacio resulta determinante del nivel de producción de los frutales. El presente trabajo establece la evolución del crecimiento de árboles de mandarina Nadorcott (*Citrus paradise x Poncirus trifoliata*), en función de los portainjertos utilizados, (*Poncirus trifoliata*, *Citrus reshni*), y las condiciones de producción de la región citrícola del noreste de Entre Ríos.

Las variables analizadas brindan información para decidir la densidad de plantación más apropiada para este mandarina en la provincia de Entre Ríos. Los resultados hallados presentan un modelo que contempla los factores citados de forma de disminuir la incertidumbre actual al momento de decidir la implantación.

Determinar un posible marco de plantación con su productividad, determina en gran medida el retorno económico al productor, y resulta clave en la planificación de una plantación perenne.

En las plantaciones cítricas resulta fundamental contar con información que permita tomar decisiones que inexorablemente repercuten económicamente al productor en varias décadas a futuro.

La variedad Nadorcott exhibe un gran interés en los productores dada la alta productividad y la calidad de frutos ofrecidos por la variedad. Es una variedad patentada que se presenta como promisorio a futuro dado el gran interés comercial de la misma. Ostenta además los beneficios de alta productividad el doble destino de su producción como son el consumo en fresco y la industria.

Palabras clave: Nadorcott, densidad de plantación, Volumen de copa, Diámetro de portainjerto, producción por hectárea.



I. INTRODUCCIÓN

A. La Variedad Nadorcott

La variedad de mandarina Nadorcott presenta una alternativa de gran demanda y rentabilidad en la región Citrícola de Entre Ríos. La misma posee un mercado importante para la comercialización de mandarinas de consumo en fresco y con destino a jugos. En Argentina las plantaciones se han incrementado en los últimos años.

En la región, la variedad posee una maduración de la fruta que se sitúa a mediados de julio y puede conservarse bien en el árbol hasta agosto.

Dada la información existente en la región de superficie plantada, el presente trabajo pretende esclarecer más aspectos determinantes para la producción cítrica en una variedad de reciente incorporación en la zona productora de mandarinas del país.

Si bien existe información internacional de la variedad y su comportamiento en otras regiones productivas, la misma no ha sido constatada a nivel local.

Los portainjertos utilizados en la citricultura de Entre Ríos han ido cambiando con la historia de la citricultura. Al respecto la evolución en la selección los mismos ha estado influenciada por factores climáticos y sanitarios. En la actualidad el portainjerto *Poncirus trifoliata*, es utilizado en la provincia de Entre Ríos en un 95 % de los árboles de cítricos plantados (Scattone, 2016).

Las incertidumbres del sector productivo podrían disminuirse si se estimaran ingresos y egresos de la producción a lo largo del tiempo en función de una curva de crecimiento del árbol frutal cítrico (Mateus Cagua & Orduz Rodriguez, 2016). Para poder determinar la producción de una variedad cítrica es clave conocer el crecimiento del árbol a lo largo del tiempo en las condiciones de desarrollo del cultivo.

B. Planificación de la Plantación

La selección del diseño, distribución y densidad del arbolado influyen de modo decisivo sobre la cantidad y calidad de las futuras cosechas, así como el desarrollo de las prácticas del cultivo y, por tanto, sobre su rentabilidad. El objetivo a la hora de diseñar la plantación es, por una parte, que los árboles puedan capturar la mayor cantidad de luz y facilitar el movimiento de la maquinaria en su interior. Las opciones son muchas, dependiendo del área de cultivo, su relieve, suelo, clima, variedad, patrón y sistema de cultivo proyectado (Agusti, 2000).

El crecimiento de los árboles está supeditado por las condiciones agroecológicas (Albrigo, et al., 2004).

Los objetivos prioritarios que se pretenden en citricultura moderna, con la poda de ramas, son la formación del árbol, la regulación de la cosecha y la mejora de la calidad. La obtención de una forma, tamaño y volumen adecuado del árbol favorece la producción de cosechas abundantes, equilibradas en su reparto en el árbol y regulares con los años, al mismo tiempo que facilita su protección y recolección reduciendo costos.

El tamaño de los árboles resulta fundamental en el diseño de la plantación. Dos aspectos prioritarios son la selección de la combinación cítrica (pie-variedad) y la poda de los árboles en producción. (Ortuzar, et al., 2004).



C. Manejo del Tamaño de los Árboles

La copa de los árboles y el volumen de carga son dos factores importantes en producción de fruta de calidad. Árboles con volúmenes más grandes de copa producen más fruta que los árboles de copa más pequeñas. El manejo del tamaño del árbol es un aspecto importante de la producción de cítricos para evitar problemas asociados con: hacinamiento y desarrollo excesivo en altura de los árboles, la intercepción de la luz, distribución de plaguicidas en la copa, así como para facilitar operación del manejo dentro de la plantación. El efecto de insuficiente radiación solar se observa frecuentemente en cítricos maduros que están no manejados correctamente. El sombreado reduce el rendimiento y el follaje en las partes bajas de los árboles. La luz del sol no solo influye en la floración y fructificación, sino que también mejora la calidad de la fruta y el desarrollo de color. El aumento de la penetración de la luz solar dentro la copa de los árboles también permite que el follaje se seque más rápidamente después de una lluvia y podría ayudar a reducir el establecimiento de hongos patógenos. Por lo tanto, se deben hacer ajustes a la copa de los árboles para maximizar la intercepción de la luz solar.

La poda es una de las prácticas hortícolas más antiguas que cambia la forma y el crecimiento de un árbol. El proceso de poda ajusta la forma del árbol y la relación de este en función del marco de plantación; altera la relación brote/raíz y cambia el estado de carbohidratos (almacenamiento de alimentos) del árbol. La poda severa de árboles cítricos sanos y maduros reduce los rendimientos en proporción a la cantidad de follaje y puede retrasar la fructificación de árboles jóvenes. (Agusti, 2000)

Dado que las plantaciones de Florida E.E.U.U. se han visto muy afectadas con el Huanglongbing (HLB) y la población de psylido está en continuo aumento, la selección del mejor momento para la poda se está volviendo más complicado. Las podas a finales de la primavera, el verano y principios del otoño pueden aumentar la población de minador de la hoja y psylidos y agravar la propagación de HLB. (Vashisth, et al., 2019 - 2020).

Si bien la poda de mantenimiento tiene por objetivo controlar el desarrollo del árbol, para el correcto manejo del mismo, esta práctica debe ser moderada, y siguiendo la tendencia natural del árbol según la especie y variedad.

El hábito natural de muchos árboles cítricos es crecer verticalmente en longitud. Este comportamiento es influenciado por: las variedades, los portainjertos, cada árbol y las condiciones climáticas. (Intrigliolo & Rocuzzo, 2011, p. 187–192).

Influencia del Portainjerto sobre la Variedad

Los portainjertos utilizados en los cítricos, poseen una gran influencia en el desarrollo de los árboles y su producción por lo tanto es necesario identificar esta interacción varietal (Pérez, et al., 2005).

El injerto y el patrón adquieren, frecuentemente, grosores distintos. Este hecho, que no constituye una verdadera incompatibilidad propiamente dicha, carece de importancia en la mayoría de los casos, incluso existiendo una gran diferencia del grosor entre el injerto y el patrón. No obstante, determinadas variedades, injertadas sobre ciertos patrones, sufren con el tiempo malformaciones en la unión que reducen su vida económica. (Forner Valero, 1984).



Densidad de Plantación

En el pasado los citricultores preferían árboles vigorosos y grandes, lo que determinaba marcos de plantación amplios. El rendimiento no se buscaba por unidad de área, sino por árboles individuales. En la actualidad se prefiere árboles del tamaño reducido que posibiliten altas densidades de plantación. Las ventajas del control de tamaño del árbol son reconocidas, resultados satisfactorios han sido obtenidos en el manzano con el uso de patrones que influyen en el tamaño de los árboles (Ecu REd, 2020).

Existen diversos estudios que aconsejan plantaciones de alta densidad, dado que durante los primeros años la producción es proporcional a la cantidad producida por árbol. Pero a medida que estos se desarrollan, los frutos cambian antes de color y adquieren una coloración más intensa en marcos de plantación anchos. Se pueden obtener elevadas producciones y frutos de calidad con marcos de plantación estrechos, siempre que estos no permitan que los árboles se entrecrucen marcadamente entre sí.

El marco de plantación o disposición de las plantas en el terreno depende de las condiciones del medio y de la propia explotación. En esto deben definirse las distancias entre líneas de árboles o masas de árboles (calles) y entre árboles dentro de la línea (Agusti, 2000).

Debe determinarse cuidadosamente la distancia entre plantas, ya que, si se dan distanciamientos muy grandes, disminuye la densidad de plantas y la producción, y baja la eficiencia de la explotación. Si se establecen huertos muy densos existe el peligro de sobrepoblación con las desventajas de competencia perjudicial entre plantas (Morin, 1980).

El marco de la plantación determina la superficie que ocupa cada árbol y a partir de esta se calcula el número de árboles por unidad de superficie o densidad de plantación. Su establecimiento constituye uno de los aspectos claves del diseño de una plantación.

La densidad de plantación, en citricultura, depende de la especie y variedad de cultivo y de las condiciones ambientales. Así en zonas tropicales, como las plantas adquieren un elevado vigor, la distancia entre árboles oscila entre 7 x 7 metros (205 árboles por hectárea) y 9 x 9 metros (125 árboles por hectárea), mientras que en las regiones subtropicales se hallan entre 8 x 8 metros (156 árboles por hectárea), como en Florida (E.E.U.U.), y 3 x 3 metros (1111 árboles por hectárea) en Japón. En España, la densidad de plantación se establece, sobre todo, según el vigor de la variedad, y varía entre 5 x 3 metros (666 árboles por hectárea) y 6,5 x 6 metros (256 árboles por hectárea) (Agusti, 2000).

La alta densidad de plantación produce buenos rendimientos en los años iniciales, pero al llegar los árboles a su máximo desarrollo dificulta la producción de frutos en cantidad y calidad (Medina-Urrutia, Becerra-Rodriguez; Ordaz-Ordaz, 2004). Los costos de implantación también son elevados al demandar mayor cantidad de plantas por ha. (Tucker D, Wheaton T, Muraro R, 1998).

Según (Intrigolio, Reforgiato, Giuffrida, 1992) las altas densidades de plantación en naranjos y limón en Italia, reportaron en ambas especies de cítricos mayor producción en altas densidades en comparación con bajas durante 6 años de producción. Sin embargo, los autores indican la necesidad de raleo de árboles entre los 8 a 10 años a los fines de mantener la producción del monte.

Las altas densidades de plantación implican un mayor gasto de plantas, cuidados culturales, fertilización, etc., así también como una mayor incidencia de plagas y enfermedades, Sin



embargo, estos factores deberían ser compensados con mayor productividad durante los primeros años del cultivo. Sin embargo, la vida futura de la plantación puede verse afectada con estas altas poblaciones debido a la resistencia del productor a eliminar oportunamente las plantas excedentes, tratando de explotarla por más años en detrimento del desarrollo y la producción del resto de las plantas.

La distancia de plantación depende del clima, suelo y combinación cítrica (variedad/portainjerto). Fundamentalmente la temperatura y las precipitaciones son el factor del clima de mayor incidencia. En las zonas cálidas y húmedas las plantas adquieren mayor desarrollo que en zonas más frías y con menos precipitaciones. Por esto en zonas cálidas la distancia de plantación suele ser mayor. Los suelos areno-arcillosos o los arcillo-arenosos con buena profundidad favorecen mejores desarrollos. Los suelos de drenaje deficiente determinan plantas más pequeñas con la consiguiente disminución de la distancia de plantación. Las combinaciones son determinantes para el cálculo de las distancias de plantación (Anderson C, 1996).

Las actuales investigaciones de cítricos en Florida plantean que las actuales plantaciones, no fueron planificadas para un diseño moderno de cosecha mecánica. "Por lo tanto, con el fin de obtener las eficiencias necesarias, deben producirse cambios en la arquitectura de la forma del árbol y del monte. Tenemos dos caminos a seguir: 1) comenzar a plantar nuevas arboledas diseñadas para la cosecha mecánica; y 2) reacondicionar las arboledas existentes para que sean adecuadas a la cosecha mecánica." (Rouse & Futch, 2016)

El monte cítrico ideal es aquel en el que hay un rápido desarrollo de los árboles con una alta cantidad de ramas para soportar altos niveles de producción. Estas arboledas proporcionan ciertas ventajas conocidas relacionadas con la producción, la cosecha y los retornos. Para su obtención se requieren, árboles de menores tamaños y plantaciones de alta densidad.

Si bien existen numerosos trabajos científicos a nivel mundial que analizan distintos marcos de plantación para las combinaciones de pie-variedad, analizando las producciones por unidad de superficie, recién en las investigaciones más recientes se ha comenzado la determinación de la eficiencia productiva del árbol. Estas determinaciones contribuyen además de probar las distintas densidades de plantación a esclarecer la eficiencia de utilización de recursos de la planta en relación con el ambiente y la competencia intraespecífica.

Influencia del HLB en el diseño de plantaciones

Shantou es el centro de la enfermedad de greening de cítricos, donde ha sido descrita por primera vez en 1919. Los agricultores locales han tratado de escapar de los efectos devastadores de la enfermedad mediante la adopción de altas densidades de plantación (HDP) de 1800 a 2000 árboles/ha, con el fin de lograr el rendimiento temprano y así acelerar el retorno económico de los costos de inversión. Como consecuencia, la rotación de los huertos también se aceleró, con el retorno al cultivo del arroz cada 10 a 12 años. Aunque se desarrolló hace muchos años, este sistema de cultivo se intensificó un poco con la propagación gradual de greening. (Bernard, et al., 1990).

Morgan en su trabajo de Sistemas de producción de cítricos para sobrevivir al HLB, plantean que la densidad de plantación es un elemento clave para el futuro. Se necesitan portainjertos que controlen el tamaño y la ausencia de opciones ha sido un factor limitante hasta la fecha. Los autores plantean que para sobrevivir al HLB y mantener su lugar como el más grande productor de cultivos alimentarios hortícolas en Florida, la industria de los cítricos



necesita adoptar un diseño y una gestión de las plantaciones más intensivas. Estas prácticas han demostrado que funcionan en otras producciones de cítricos del mundo. (Morgan, et al., 2009).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la Provincia de Entre Ríos en los departamentos de Concordia y Federación, en una empresa productora, la cual puso a disposición de este estudio lotes de la variedad de interés para la toma de datos a campo.

Para la selección de los árboles se utilizó el sistema de muestreo sistemático. Este tipo de muestreo considera los elementos de la población sobre la que se realiza el muestreo en un orden específico.

Se tomaron muestras de una manera directa y ordenada a partir de una regla determinística (sistemática). A partir de una unidad seleccionada en primer lugar, el resto de unidades de la muestra se determinaron automáticamente al aplicarle a dicha unidad una regla selección sistemática.

En cada quinta se seleccionaron lotes de diferentes edades a los fines de cumplimentar la curva de crecimiento.

Se realizaron las comparaciones por quinta dentro de la misma edad y tipo de portainjerto, evaluando las variables de crecimiento en cada caso. Dentro de cada lote, los árboles fueron seleccionados azar.

Se midieron las variables de crecimiento: altura de la planta, para lo cual se utilizó una regla graduada en cm que se aplicó del lado norte de cada planta cercano al tronco; diámetro de la copa, con cinta métrica en forma perpendicular al lineo de plantación; diámetro de tronco 10 cm por encima del injerto y 10 cm por debajo del injerto diámetro del portainjerto con forcípulas.

A partir de las variables medidas se calculó el volumen de copa (VC) en m³, mediante la fórmula definida por (Turrel, 1946):

$$VC=0.5236*H*D^2 \quad (1)$$

Donde: H es la altura de planta y D es el diámetro de la copa.

Los valores medios de las variables de crecimiento analizadas, se utilizaron para la construcción de una curva de crecimiento de las plantas. Como resultado se obtuvo una ecuación de estimación del volumen de copa ajustada. Luego con los datos de volumen de copa estimados para una planta adulta de 19 años, se realizó un cálculo del volumen de copa, en metros cúbicos por hectárea para la edad mencionada. A la vez se estimó el volumen necesario para la adecuada insolación, hallándose como resultado una densidad de plantas por hectárea.

Para analizar el comportamiento de la variedad en la relación con *Poncirus trifoliata*, se evaluó la relación diámetro de tronco, diámetro de portainjerto, y se determinó la incidencia de la compatibilidad con el desarrollo de las plantas a traves del volumen de copa.



Posteriormente se relevaron datos productivos de cada lote evaluado, y se determinó su producción por planta para las edades estudiadas. Mediante estos datos se hallaron dos ecuaciones de predicción de la producción, una en función de la edad y otra en función del volumen de copa.

Por último, tomando los datos de producción por planta de los lotes evaluados y su distanciamiento entre filas y plantas, se determinó la producción en kilogramos por metro cúbico por planta. Este valor se utilizó para estimar la producción en plantas desarrolladas a partir del volumen de copa calculado por la ecuación ajustada.

III. RESULTADOS

En función de las mediciones de altura y ancho de la copa y utilizando la ecuación (1) se hallaron los volúmenes de copa de la variedad para las diferentes edades:

Tabla 11: Estadísticas descriptivas de volumen de copa por edad de la planta (m3)

Edad de la planta (años)	Media	Desvío Estándar	Número de casos	Mínimo	Máximo
6	6.51	2.06	102	1.69	13.39
7	11.59	2.54	123	5.97	21.15
8	10.42	2.12	71	5.69	17.20
11	11.83	2.21	19	8.03	16.16
12	13.10	2.30	42	8.29	19.22
13	15.52	2.61	106	7.89	22.02
14	17.06	2.96	63	9.92	25.25
15	17.38	3.02	81	9.55	24.69
17	19.52	2.78	84	13.65	27.31
18	21.21	3.86	59	13.65	34.31
19	24.01	3.31	59	17.35	31.89

Se realizó una prueba no paramétrica para observar si existen diferencias entre las edades en relación al volumen de copa. Los resultados se observan en la siguiente tabla:

Tabla 2: Diferencias entre las edades en relación al volumen de copa m3

Trat.	Ranks	
6	66,31	A
8	197,61	B
7	253,56	B C
11	262,95	B C
12	324,61	C
13	443,72	D
14	515,62	D E
15	528,46	E
17	619,49	F
18	662,42	F G
19	738,81	G

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)



Los seis años de edad de la planta tiene el menor volumen de copa, de los 7 a los 11 años la diferencia encontrada no es significativa, pero muestra un incremento respecto a los 6 años. Se encuentra un incremento de volumen de copa entre los 11 y los 12 años respecto al periodo anterior. Igual situación se observa de 13 y 14 y posteriormente entre los 14 y 15, 17 y 18; y 18 y 19 respectivamente.

Con los datos obtenidos, se realizó un análisis de regresión lineal y no lineal. Las regresiones lineales se probaron polinomios de diferente orden encontrándose que el polinomio de orden 4 representa de mejor manera la variable en estudio. Dentro de estos se utilizó como elemento aleatorio la quinta de donde provenían los datos a fin de reducir la variabilidad de los mismos. Este efecto no resulto significativo por lo cual se seleccionó el modelo polinomial simple.

El modelo ajustado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * Edad + \beta_2 * Edad^2 + \beta_3 * Edad^3 + \beta_4 * Edad^4 + \epsilon_{ij}$$

Los coeficientes β hallados son:

$$\beta_0 = -53.55, \beta_1 = 20.19, \beta_2 = -2.278, \beta_3 = 0.1127, \beta_4 = 0.001975$$

En función del tamaño de planta adulta obtenido a través del volumen, de copa, y teniendo en cuenta el espacio libre necesario para la intercepción foliar, se determinó el volumen a ocupar por planta de 116,6 m³. Con la disponibilidad de 40000 m³ por hectárea, se puede determinar una densidad de plantación optima a tamaño adulto de 343 plantas por hectárea en función del volumen a ocupar por una plantación adulta.

D. Relación volumen de copa con la relación diámetro de tronco/diámetro del portainjerto

La relación de crecimiento del árbol en función del crecimiento del portainjerto, se evaluó a través de las variables de crecimiento del volumen de copa y la relación diámetro del tronco y del portainjerto.

Se analizó esta relación, a los fines de evaluar una posible interacción en el crecimiento de los árboles con el portainjerto.

Se determinó el incremento anual de volumen de copa de los árboles y se comparado con el coeficiente.

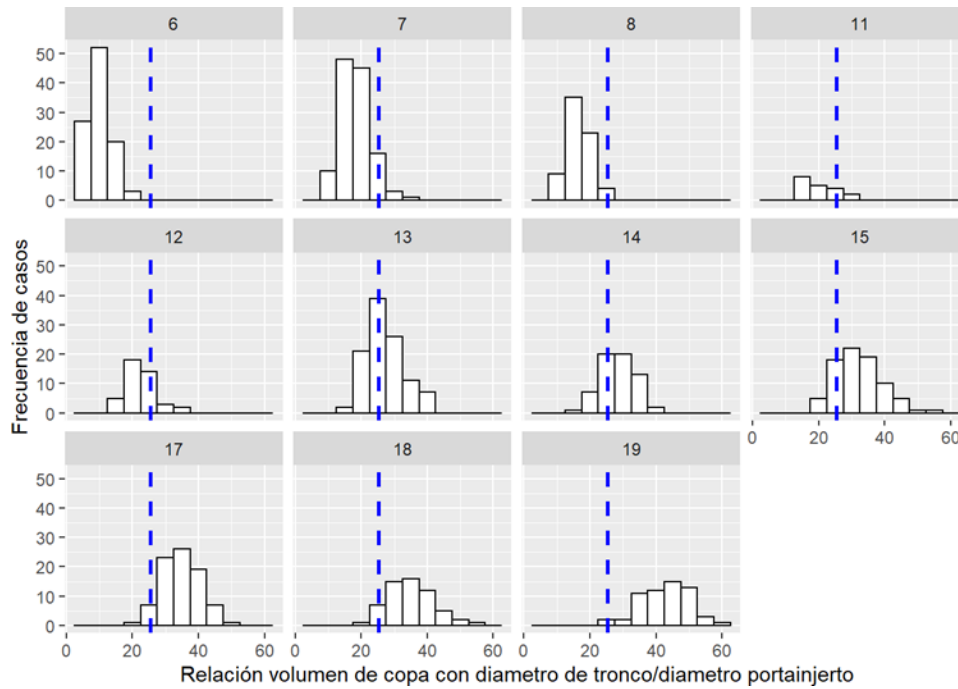


Gráfico 1: distribución de frecuencias de volumen de copa y diámetro de tronco/diámetro de portainjerto según la edad de la planta. Línea azul representa el valor medio de la base general

La relación entre estas variables se negativa (-0.38). Se puede observar que, si bien la relación diámetro de tronco con el diámetro de portainjerto disminuye a lo largo del tiempo, este fenómeno no afecta el crecimiento de la copa del árbol medido a través de volumen de copa.

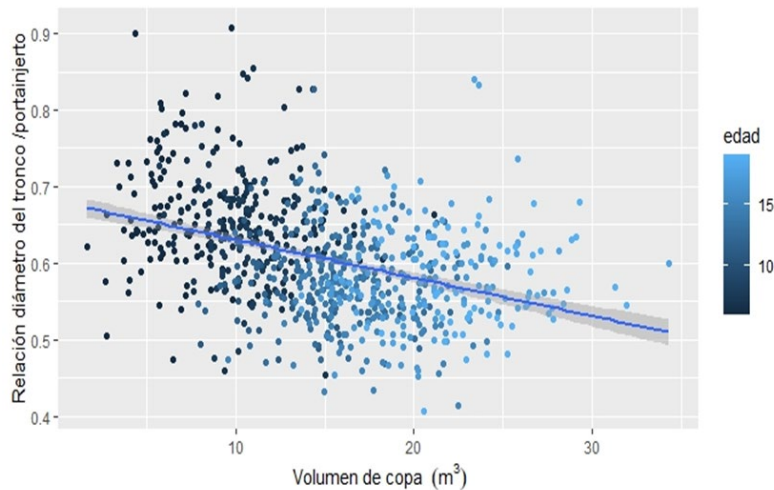


Gráfico 2: Volumen de copa y diámetro de tronco/diámetro de portainjerto según la edad de la planta.

En edades inferiores de la planta la relación de diámetro de copa portainjerto es mayor y corresponden con los valores inferiores de volumen de copa. Contrariamente ocurre con edades avanzadas.



E. Análisis de datos productivos

Con el objeto de cuantificar la producción por árbol en función de la edad de las plantas se obtuvo información de cosecha de los lotes en kilogramos anuales. Se plantearon diferentes modelos de regresión múltiple en el cual se tomó a la producción como variable respuesta y a las demás variables explicativas utilizando metodología de stepways. Los modelos con mayor ajuste corresponden a las siguientes ecuaciones:

$$\text{Prod (Kg/planta)} = -6.04 + 3.34 * \text{Vol copa} \quad (2)$$

$$\text{Prod (Kg/planta)} = 3.57 * \text{edad de la planta} \quad (3)$$

Calculando la producción por edad y el volumen de copa utilizando las ecuaciones se desarrollan valores sin considerar la alternancia de producción y hallando valores medios productivos anuales.

A partir de la producción de los lotes analizados y su distancia de plantación, se determinó el volumen de copa de las plantas a campo y su producción por metro cubico de planta:

*Tabla 3: Kilogramos por metro cubico en función de la edad.
Fuente: Elaboración propia.*

Edad	6	7	8	11	12	16	18	19
Producción Kg/planta	4,8	29,2	37,2	15,7	55,4	74,5	38,1	69,0
Volumen de copa en plantas evaluadas	5,9	7,2	6,5	12,3	13,0	15,6	17,9	18,6
Kg/m ³ e la plantación evaluada	0,8	4,1	5,7	1,3	4,3	4,8	2,1	3,7

Reemplazando la producción por planta relevada por la ecuación de producción en función de la edad se determinó la producción en Kg/m³:



Tabla 4: Producción en función de ecuaciones de eficiencia productiva.

Fuente: Elaboración propia.

Edad	6	7	8	11	12	16	18	19
Producción en función de Kg/m ³ * en función de la edad	21,4	25,0	28,6	39,3	42,8	57,1	64,3	67,8
Volumen de copa en plantas evaluadas	5,9	7,2	6,5	12,3	13,0	15,6	17,9	18,6
Kg/m ³ de la plantación evaluada	3,6	3,5	4,4	3,2	3,3	3,7	3,6	3,6
Producción en función de Kg/m ³ *	26,7	35,0	51,7	44,8	47,9	68,0	78,2	85

* Utilizando la producción en Kg/m³ de plantación evaluada se calculó la producción por planta en kg/m³ para el volumen de copa potencial por ecuación.

Se observa que la producción por metro cubico para las diferentes edades no presenta variaciones importantes, mostrando estabilidad en el tiempo del parámetro.

Tomado como base la producción por metro cubico, se calculó la producción por planta en función del volumen de copa:

Tabla 52: Producción por planta en kilogramos

Edad	6	7	8	11	12	16	18	19	20
En función de kg/m ³ y el volumen de planta Potencial Ecuación	26,71	35,04	51,70	44,80	47,93	67,98	78,21	85,01	94,12
En función de kg/m ³ y el volumen de planta de la plantación evaluada	21,42	24,99	28,56	39,27	42,84	57,12	64,26	67,83	71,40

Tomado en cuenta los datos de producción por metro cubico y por planta en función del volumen de copa se determinó la producción por hectárea a modo de evaluar la productividad de diferentes densidades de plantas por hectárea. Se calculó la distancia establecida de acuerdo a la recomendación de máxima insolación para el volumen de copa hallado 5,4 x 5,4, en la distancia evaluada a campo en los lotes medidos 6 x 3, una alternativa de espaciamiento en calles para lograr la máxima insolación asociada al espacio de filas del máximo diámetro de copa hallado en el estudio. Esta última se redondeó a 5,5 x 3,5.

En función de las ecuaciones halladas y el distanciamiento de plantas se realizaron curvas de producción:



Gráfico 3: Producción en función de densidades de plantación

Se puede observar que el distanciamiento de 5,5 x 3,5 demuestra el mayor potencial productivo para la variedad y el portainjerto estudiado:

IV. DISCUSIÓN

Se realizaron determinaciones de crecimiento de la variedad en suelos típicos de la región hallándose datos descriptivos de la variedad a lo largo del tiempo. Los valores hallados describen el crecimiento de la variedad y su producción a lo largo del tiempo en las condiciones agroecológicas de la región. Las recomendaciones actuales de E.E.A, INTA Concordia, sobre el crecimiento de los árboles de otras especies y variedades como el caso de naranja Valencia late con igual metodología, han encontrado resultados descriptivos en sus estudios. Se han caracterizado otras especies y variedades en varias regiones del mundo, pero la desarrollada en el presente carecía de descripción local.

Se halló un modelo de crecimiento del volumen de copa que permite describir el comportamiento de crecimiento del árbol sobre el portainjerto analizado. Esta información permite incluir en los parámetros que describen la variedad portainjerto a lo largo de la vida de la plantación. Si bien existe variabilidad en los datos encontrados el modelo hallado incluye esta característica de los datos. La variable que presenta mayor dispersión de datos, es la altura de las plantas ya que las brotaciones superiores de los individuos provocan la variación.

El crecimiento de copa pudo ser comparado con el portainjerto *Citrango* mostrando este último un volumen de copa mayor comparado con trifolío. Estos datos demuestran la necesidad de profundizar los conocimientos de este pie de mayor transferencia de vigor a la copa para determinar su volumen de copa y posibilidades de determinación de la distancia de plantación óptima. La utilización de portainjertos de mayor vigor deberá ser analizada con posterioridad para determinar modelos de crecimiento de este último. Las mayores dimensiones de este portainjerto demuestran la necesidad de mayores espacios requeridos por planta.

Se hallaron ecuaciones de predicción de la producción en base a datos locales que permiten determinar la producción en kilogramos por planta y por hectárea. Los datos relevados corresponden a valores de producción de la población analizada lo cual otorga al modelo una importante solidez de sus datos. El modelo incluye la variabilidad asociada a condiciones agroecológicas de las plantaciones en la región, esto otorga sustentabilidad para su utilización posterior. Sería adecuado utilizar y validar esta ecuación de producción en otros establecimientos de la región con el objeto de solidificar su utilización.



Las densidades de plantación utilizadas en la región no son descriptas para esta combinación de variedad/portainjerto, con lo cual las recomendaciones que surgen del presente trabajo contribuyen a esta elección. En el presente estudio, se determinaron densidades de plantación óptimas, para la combinación de copa portainjerto, para la zona productiva, y para plantas adultas considerando un máximo crecimiento de las plantas evitando la competencia. Será posible con el modelo de crecimiento de plantas, establecer densidades mayores en las etapas juveniles, realizando un raleo de plantas cuando existe competencia por recursos. Para este análisis será necesario incluir factores económicos en su determinación como precio de plantas, costo de producción por año e ingresos por ventas.

Si bien las densidades de planta determinadas, se basan en los modelos de crecimiento de copa hallados, estos fueron determinados para las condiciones agroecológicas y de manejo recomendadas en la zona. Es probable que, en otras condiciones, mayores temperaturas, el crecimiento de la combinación sea superior y por ende las densidades deban disminuirse. Con condiciones agroecológicas diferentes a la zona de estudio, estas deberían ser ajustadas.

Con los volúmenes de copa hallados es posible determinar que el incremento de la densidad de plantas, es determinante en el incremento de producción por hectárea. Esta decisión posee una limitación determinada por el sombreado y sectores improductivos en el árbol. Si bien en la región existen numerosas plantaciones de mayor densidad de plantas, las mismas poseen porciones de copa improductivas que no mejoran la productividad por hectárea en plantaciones adultas. El efecto de mayor producción por hectárea en las plantaciones, solo se verá reflejado durante los primeros años de plantación. Factores sanitarios de área de la copa improductiva y de retención de mayores humedades en las plantaciones serán factores a analizar para su control.

Dada el creciente desarrollo tecnológico de drones, sensores remotos y demás herramientas digitales, será posible la incorporación de estas herramientas para las investigaciones científicas en la agricultura. Los resultados obtenidos podrán ser utilizados como herramienta de correlación con determinación obtenidas a través de métodos digitales.

V. CONCLUSIONES

Se estudió el crecimiento de la planta a través de los años para un tipo de suelo predominante en la región y su rendimiento productivo en el tiempo.

Se obtuvo un modelo de crecimiento de la variedad sobre *P. trifoliata* en el tiempo desde edades juveniles hasta, la adultez. Las variables obtenidas en el tiempo permitieron hallar un modelo predictivo de evolución del volumen de copa.

Se hallaron coeficientes de eficiencia productiva de la variedad sobre el portainjerto a lo largo de su crecimiento. Estos valores no varían en el tiempo, y el aumento de la producción por planta está determinado por el incremento del volumen de copa.

El modelo de crecimiento de copa permitió hallar modelos de densidades de plantación capaces de maximizar el espacio de plantas adultas y la producción por hectárea sin limitar el crecimiento de las plantas. Sería posible incrementar la densidad de plantas durante los primeros años donde el espacio aéreo no es ocupado en su totalidad para mejorar la eficiencia. Esto podría mejorar la producción por hectárea durante los años iniciales, pero requerirá de intervenciones posteriores para que no exista interacción entre plantas cuando el crecimiento de las mismas lo provoque. Este diseño de la plantación debería analizarse en futuros estudios.



Se comprobó que el incremento en la densidad de plantas, no está asociado a un aumento de producción por hectárea, ya que las plantas individualmente compiten por espacio. El modelo de crecimiento de ancho de copa permite describir en el plano esta característica.

Los volúmenes de copa hallados permiten describir la ocupación del espacio de las plantas para las condiciones analizadas.

Las plantaciones existentes en los establecimientos, presentaron una distribución espacial deficiente de marco de plantación provocando sombreo entre plantas determinando porciones improductivas dentro del árbol. En estas circunstancias las plantas son incapaces de desarrollar su potencial productivo.

La relación del portainjerto trifolio con la variedad, se pudo evaluar a través del crecimiento de ambos. Esta combinación si bien presenta un crecimiento de unión no armónica, varía en el tiempo. Durante los primeros años la relación de crecimiento presenta mayor similitud en diámetro. Con el crecimiento en el tiempo de la planta la diferencia en crecimiento del portainjerto es más marcada. Pese a esta característica de la unión la misma no muestra una interacción entre esta diferencia de crecimiento y los árboles. Esto muestra que el incremento del volumen de copa no se ve afectado por la interacción con el portainjerto.

Los valores de producción que se pueden determinar con las ecuaciones halladas describen la producción posible de alcanzar en plantaciones de la zona. Estos valores corresponden a las condiciones reales a través de los años con la interacción del ambiente y promedian la alternancia de la producción entre años. Si bien los fenómenos agroecológicos pueden hacer variar un año en particular la producción de un lote, este valor puede recuperarse en años posteriores, mostrando la curva la producción anual media.

En la comparación de la evolución de la variedad en el tiempo, sobre los portainjertos utilizados, se encontraron diferencias significativas en su crecimiento mostrando Citrange troyer un mayor volumen de copa que Poncirus trifoliata.

Los estudios realizados permiten describir el crecimiento y la productividad de la variedad en la zona de los departamentos de Concordia y Federación, Entre Ríos. Estos resultados permitirán mejorar la planificación de la plantación, en su densidad de plantas, así como en la cuantificación de producción e ingresos para el productor.

Las densidades de plantación determinadas como óptimas en el presente trabajo difieren de las actualmente utilizadas en la región. Aumentar la densidad de plantación no necesariamente incrementa el volumen de producción por hectárea en plantaciones adultas. Existe bajo esta metodología disminución de la capacidad productiva individual de las plantas por la competencia de espacio. Si se pretende alcanzar altos volúmenes productivos por planta y por hectárea es necesario lograr desarrollo de plantas conforme a su potencial individual. Con esta premisa las mismas expresan su máximo potencial productivo.

La utilización de la variedad sobre otros portainjertos, como como Flydragon podría disminuir el volumen de copa de la variedad y favorecer el aumento de densidad de plantas, pero no necesariamente un aumento de producción por hectárea. Para realizar estas determinaciones será necesario estudiar los parámetros hallados en este estudio.

Las determinaciones obtenidas permiten caracterizar a la variedad en el agroecosistema local. Se obtuvo un modelo de crecimiento de la planta que puede ser adecuado a nuevos



marcos de plantación en ciclos de rotación del cultivo más cortos que el actual. Esta situación podría esperarse si el control del HLB no resultara satisfactorio y las plantaciones necesitaran ser recambiadas con menor edad. Los parámetros hallados, permitirán adecuar el distanciamiento y la productividad al nuevo escenario.

Los resultados permiten cuantificar un problema concreto, como es la determinación del marco de plantación en función de parámetros de crecimiento del árbol. La predicción de producción en el tiempo permitirá precisión en la elaboración de la planificación y cuantificación económica del cultivo.

VI. AGRADECIMIENTOS

. Deseo mencionar mi agradecimiento al tutor Dr. Miguel Luis Ragone y al Co Director Dr. Roberto Alfredo Varela por el apoyo brindado durante todo el desarrollo del trabajo sin los cuales la realización del mismo se hubiera dificultado de sobremanera. A la empresa Trébol Pampa S.A. por permitir la realización del trabajo de campo en sus instalaciones y brindar información necesaria para el estudio. A la Ingeniera Agrónoma Alejandra Cuatrin por su aporte científico realizado para la concreción de los resultados obtenidos.

También expreso mi mayor reconocimiento el aporte realizado en mi formación académica por la Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER, quien me ha formado desde la carrera de grado y postgrado, brindando un ámbito placentero para el estudio y el desarrollo profesional.

VII. REFERENCIAS

- Agrios, G. N., 2010. *Fitopatología*. Mexico: Limusa, S.A. de C. V..
- Agusti, M., 2000. *Citricultura*. 1999 ed. Madrid: Mundi-Prensa.
- Albrigo, L. G., Valiente, J. I. & Van Parys de Wit, C., 2004. *Major Factors Influencing Year to Year Variation of Yields in Brazilian Production*. Agadir, Morocco, The Internacional Society of Citriculture, p. 44.
- Anderson C, B. G. B. H. C. C. N. D. E. F. A. G. S. L. L. M. G. M. M. R. M. J. P. M. R. M. R. R. V. N. V. D., 1996. *Manual para productores de naranja y mandarina de la región del Rio Uruguay*. Concordia: Artesanía Grafica..
- Anon., 1987. Calculating canopy area of citrus trees and surface area of citrus. *Florida Entomologist*, 70(1), pp. 198-171.
- Anon., 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany*, 47(302), pp. 1335-1342.
- Ashkenazi, S., Asor, Z. & Rosenberg, O., 1993. HIGH DENSITY CITRUS PLANTATION - THE USE OF FLYING DRAGON TRIFOLIATE AS AN INTERSTOCK. *ISHS Acta Horticulturae 349: V Simposio Internacional sobre Orchard y de plantación Sistema*, 32(349), pp. 203-204.
- Ashkenazi, S. A. Z. a. R. O., s.f.
- Aubert, B., 1990. *Hight Density Planting (HDP) of Jiogan Mandarin in the Lowland area of Shantou (Guangdong China) and Implications for Greening Control*. Chiang Mai, Thailand, Proceedings of the 4th International Asia Pacific Conference on Citrus Rehabilitation, pp. 149-155.



Bernard, A., Tontyaporn, S. & Buangsuwon, D., 1990. High density planting (HDP) of Jiaogan mandarine in the lowland area of Shantou (Guangdong China) and implications for greening control. *FAO Rome*, pp. 149 -157.

Cambra, M. & Cambra, R., 1991. *Diseño de Plantacion y Formacion de Arboles Frutales*. Zaragoza: s.n.

Central, U. d. P. B., s.f. *Universidad de Piura Biblioteca Central*. [En línea]
Available at: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_59_185_24_508.pdf

Chabbal, M. D.; Giménez, L. I. ; Garavello, M. F.; Alayón Luaces, P.; Rodríguez, V. A. y Mazza, S. M., 2015, Vol 36. Caracterización de naranjo 'Valencia Late' sobre diferentes portainjertos en "Entre Ríos", Argentina. *Cultivos Tropicales*, pp. 94-99.

Chang, A., Yeom, J., Jung, J. & Landivar, J., 2020. *Comparación de la forma del dosel y los índices de vegetación de los árboles de cítricos derivados de imágenes multiespectrales de UAV para la caracterización de la enfermedad del enverdecimiento de los cítricos*. [En línea]
Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12244122>
[Último acceso: 12 Mayo 2022].

City of Citrus Heights, 2015. *City of Citrus Heights Urban Tree Canopy Assessment A component of the Citrus Heights Urban Greening Strategy (CHUGS)*, California: Davey Resource Group.

ClubVVP, 2020. *Compañía de Variedades Vegetales Protegidas A.I.E.* [En línea]
Available at: <https://clubvvp.com/nadorcott/#1453887735337-6425fa94-dac5>
[Último acceso: 02 04 2020].

EcuREd, 2020. *EcuRed*. [En línea]
Available at: https://www.ecured.cu/Patrones_c%C3%ADtricos
[Último acceso: 06 04 2020].

FEDERCITRUS, 2016. *Federcitrus*. [En línea]
Available at: <http://www.federcitrus.org/noticias/upload/informes/Act%20Citricola%2016.pdf>
[Último acceso: 1 11 2016].

Forner Valero, J. B., 1984. *Interacciones entre el Injerto y el patron de los agrios*, Madrid: Neografis, S. L.

Furio PLa, J., s.f. *Poda de Citricos*, s.l.: s.n.

Gambetta, G. y otros, 2013. Self-incompatibility, parthenocarpy and reduction of seed presence in 'Afourer' mandarin. *Scientia Horticulturae*, Issue 164, pp. 183-188.

Gonzales Sicilia, E., 1960. *El cultivo de los Agrios*. 1960 ed. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agronomicas.

Gonzales, M. d. C. & Pagliettini, L. L., 2006. *Los Costos Agrarios y sus Aplicaciones*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires.

Gravina, A. y otros, 2000. Estudio del comportamiento alternante de la narnaja Salustiana en diferentes condiciones productivas. *Agrociencia*, IV(1), pp. 17-22.

Gravina, A., Gambetta, G., Rey, F. & Guimaraes, N., 2016. Mejora de la productividad en mandarina 'Afourer' en aislamiento de polinización cruzada. *Agrociencia Uruguay*, 20(2), pp. 22-28.



- Hernandez Mazzini, F., 2017. *Respuesta vegetativa y productiva de la mandarina 'Afourer' a distintos tipos de poda y manejo de la brotación interior*, Montevideo: Universidad de la Republica.
- INTA Centro Regional Entre Ríos E.E. A. Concordia, 2018. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. [En línea]
Available at: www.inta.gob.ar
- Intrigliolo, F. & Rocuzzo, G., 2011. Modern Trends of Citrus Pruning in Italy. *Advances in Horticultural Science*, 25(3), pp. 187-192.
- Intrigolio, Reforgiato, Giuffrida, 1992. *Effect of planting density and rootstock performance of Valencia*. *Acireale, International Society of Citriculture*, pp. 709-710.
- Jauch, C., 1985. *Patología Vegetal*. Buenos Aires: El Ateneo.
- Joubert, F., Plessis, M., Steenkamp, E. & Stassen, P., 2002. Manipulation of citrus trees for new higher density orchards. *Horticultural*, 4(1), pp. 17-20.
- Mahohoma, W., 2016. *Measurement and modeling of water use of citrus orchards*, Pretoria: University of Pretoria.
- Martínez Fuentes, A., 2011. *El tiempo de permanencia del fruto en el árbol y su relación con la floración en los cítricos*, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mateus Cagua¹, D. & Orduz Rodríguez, J. O., 2016. Efecto de distancias de plantación sobre el rendimiento y crecimiento vegetativo de la naranja 'Valencia' (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) en el trópico bajo húmedo de Colombia. *ORINOQUIA - Universidad de los Llanos*, 20(1), pp. 19-27.
- Mateus Cagua, D. & Orduz Rodríguez, J. O., 2016. Efecto de distancias de plantación sobre el rendimiento y crecimiento vegetativo sobre naranja Valencia (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) en el trópico bajo húmedo de Colombia. *ORINOQUIA*, pp. 19-27.
- Medina-Urrutia, Becerra-Rodríguez; Ordaz-Ordaz, 2004. Crecimiento y Rendimiento de Limón Mexicano en Altas Densidades de Plantación en el Trópico. *Chapingo Serie Horticultura*, 1, Issue 10, pp. 43-49.
- Mercado Central de Buenos Aires, 2018. *Información del Mercado Central de Buenos Aires, Al Central*. [En línea]
Available at: <http://www.alcentral.com.ar/mayoristas/>
- Millan, J. D., 2007. Diseño de Plantación. *Dossier Tecnol.*, pp. 13-16.
- Montgomery, D. C., 2009. *Introduction to Statistical Quality Control*. Sixth ed. Tempe(Arizona): John Wiley & Sons, Inc..
- Morgan, K. T., Schumann, A. W. & Castlez, W. S., 2009. *Citrus Production Systems to Survive Greening: Horticultural Practices*. Florida, Proc. Fla. State Hort. Soc. 122.
- Morin, C. L., 1980. *Cultivo de Cítricos*. 1980 ed. Lima: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- Ortuzar, J. y otros, 2004. *Climatic Effects on Fruit Quality and maturity of Navel Orange in Nine Growing Regions of Chile*. Agadir, Morocco, International Society of Citriculture, p. 45.
- Otero, A., 2004. *INIA Salto Grande*. [En línea]
Available at: <http://www.inia.org.uy>
[Último acceso: 24 04 2020].



- Otero, A. & Fernando, R., 2017. Field spatial pattern of seedy fruit and techniques to improve yield on 'Afourer' mandarin. *Scientia Horticulturae*, Volumen 225, pp. 264-270.
- Pallas, V., Escobar, C., Rodriguez Palenzuela, P. & J.F., M., 2008. *Herramientas Biotecnológicas en Fitopatología*. Madrid: Mundiprensa.
- Perez O, B. S. M. V., 2005. Comportamiento de crecimiento y rendimiento de naranjo Valencia (*Citrus sinensis* L.) injertado en varios portainjertos en suelos calcisol vertico y petrico. *Avances en Investigacion Agropecuaria*, pp. 33-51.
- Perez Zamora, O., Medina Urrutia, V. & Salvador, B. R., 2006. *eLibro net*. [En línea] Available at: <https://elibro.net/es/ereader/uner/18985?page=2> [Último acceso: 27 04 2020].
- Pérez, O., Becerra, S. & Medina, V., 2005. Comportamiento de crecimiento y rendimiento de naranjo Valencia (*Citrus sinensis* L.) injertado en varios portainjertos en suelos calcisol vértico y pétrico.. *Revista de investigación y difusión científica agropecuaria*, II(9), pp. 33 - 51.
- Ragone, M. L., 1992. *Comportamiento de la naranja Valencia en tres distancias de plantacion y dos portainjertos*, Concordia: INTA - Entre Rios.
- Rhuanito Ferrarezi, S., Wrigh, A. L. & Schumann, A. W., 2017. Protected Fresh Grapefruit Cultivation Systems: Antipsyllid Screen Effects on Plant Growth and Leaf Transpiration, Vapor Pressure Deficit, and Nutrition. *Hordtechnology*, 27(5), pp. 666-674.
- Rivadaneira F., Garavello M., Gimenez L., 2016. *Crecimiento de portainjertos citricos en vivero bajo cubierta y su comportamiento a campo*, Concordia, Entre Rios: s.n.
- Riverside, U. o. C., 2021. *Citrus Variety Collection*. [En línea] Available at: <https://citrusvariety.ucr.edu/citrus/wmurcott.html> [Último acceso: 12 Junio 2021].
- Rouse, R. & Futch, S., 2016. *UF IFAS Extension University of California*. [En línea] Available at: <https://edis.ifas.ufl.edu/hs219> [Último acceso: 03 04 2020].
- Said, H. A. & Morgan, K. T., 2020. *Effect of Various Irrigation Rates on Growth and Root Development of Young Citrus Trees in High-Density Planting*. [En línea] Available at: <https://doi.org/10.3390/plants9111462>
- Sanchez Hinojosa, R. C., 2016. *Determinación de la biomasa a partir de medidas dendrométricas en el cultivo de mandarina (Citrus reticulata L.)*, Ibarra, Ecuador: Universidad Tecnica del Norte, Facultad de Ingenieria en Ciencias Agropecuarias y Ambientales.
- Sanz, R. y otros, 2011. *Relationship between tree row LIDAR-volume and leaf area density for fruit orchards and vineyards obtained with a LIDAR 3D dynamic measurement system*, Lleida: Department of Agro-forestry Engineering, University of Lleida.
- Saunt, J., 2000. *Citrus Varieties of the World*. Segunda ed. Norwich: Sinclair International Limited.
- Scattone, G., 2016. *Censo Provincial Citrícola 2015/2016*, Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones.
- Schumann, Hostler, Buchanon, Zaman, 2006. *Relating Citrus canopy size and yield to precision fertilizacion*, Florida: s.n.



- Server Izquierdo R.J, Mateos Ronco A., Lajara de Camilleri N., 2009. *Cuestiones referentes al sector cítrico más relevantes para la definición de la política de seguros agrarios: situación actual y tendencias a corto y medio plazo*, Valencia, España: Centro de Investigación en Gestión de Empresas Universidad Politécnica de Valencia.
- Server Izquierdo, R. J., Mateos Ronco, A. & Lajara de Camilleri, N., 2009. *Cuestiones referentes al sector cítrico más relevantes para la definición de la política de seguros agrarios: situación actual y tendencias a corto y medio plazo*, Valencia: Centro de Investigación en Gestión de Empresas Universidad Politécnica de Valencia.
- Snelgar, W. y otros, 1998. Relación entre la densidad del dosel y la calidad de la fruta del kiwi. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 26(3), pp. 223-232.
- The American Phytopathological Society, 2017. APS. [En línea]
Available at: <https://www.apsnet.org/about/Pages/default.aspx>
- Treeby, M. T. & Thornton, I. R., 1983. An evaluation of the interaction between interstocks and rootstocks on the yield and tree size of 'VALENCIA' ORANGE. *Scientia Horticulturae*, 1983(19), pp. 229 - 235.
- Tucker D, Wheaton T, Muraro R, 1998. *Citrus Tree Spacing and Pruning*, Florida, E.E.U.U.: s.n.
- Tucker, D., T.A., W. & R.P., M., 1994. *Citrus Tree Pruning Principles and Practices*, Florida: Florida Cooperative Extension Service.
- Turrel, F., 1946. *Tables of surfaces and volumes of spheres and prolates and oblates spheroides and spheroidal coefficients*. Berkeley, EEUU: University of California Press..
- USPP10480P, 1997. *Google Patentes*. [En línea]
Available at: <https://patents.google.com/patent/USPP10480>
[Último acceso: 29 04 2021].
- Vashisth, T., Zekri, M. & Alferez, F. M., 2019 - 2020. *UF IFAS Extension, University of Florida*. [En línea]
Available at: <https://edis.ifas.ufl.edu/hs1303>
[Último acceso: 03 04 2020].
- Vera, L., 2017. *INFORME DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS 20171*, Concordia: Publicaciones INTA.
- Wheaton, A. C. W. S. & Tucker, D. P. .. f., 1978. *Citrus- Concepts Higher Density Plantings For Florida*. Florida, Proceeding Florida State Hort. Soc., pp. 27-33.
- Wheaton, T. A. C. W. S., Whitney, J. D. T. D. P. H. & P., M. R., 1990. *A high density Citrus planting*. Florida, University of Florida, pp. 55-59.
- Whitney, J. & Wheaton, T., 1984. *Tree Spacing affects citrus fruit distribution and yield*. Florida, Reprinted from Proceeding Florida State Horticulture Society , pp. 44-47.
- Wutscher H.K., B. K., 1999. Performance of Valencia Orange on 21 Rootstocks in Central Florida. *HortScience*, pp. 622-624.



Modelo de Distribución Resistivo del Subsuelo y sus Aplicaciones en Ingeniería Geológica, Cuenca del Arroyo Palmar, Entre Ríos.

Doctorando: Mario Rafael Hernán Chury

*Universidad Tecnológica Nacional Regional Concordia (FRCON), Entre Ríos.
mrhchury@frcon.utn.edu.ar*

Director: Ángel Adrián Silva Busso

Codirector: Gerardo A. Riccardi

Resumen: Esta tesis aborda una investigación sobre las relaciones entre parámetros geomecánicos de los suelos como el contenido de finos, contenido de arcilla, ángulo interno de fricción, cohesión y el contenido de agua, con mediciones de resistividad eléctrica en campo como metodología para su estimación. En su desarrollo se encontraron correlaciones muy favorables entre la resistividad eléctrica y su contenido de finos ($r^2 = 0.84$), con su contenido de arcilla ($r^2 = 0.81$) y con su ángulo interno de fricción ($r^2 = 0.90$). Sin embargo, se presentaron valores que se consideran aceptables para los ambientes naturales de correlación entre la resistividad eléctrica y la cohesión ($r^2 = 0.64$) y con el contenido de agua ($r^2 = 0.65$). De esta forma se confirma la hipótesis de que es posible estimar cuantitativamente los parámetros geomecánicos mencionados analizando su comportamiento geoelectrico tanto en campo como en laboratorio.

Palabras clave: Resistividad eléctrica; Geoelectrica; Geomecánica; Correlación.

I. INTRODUCCIÓN

La realización de importantes obras de estructuras en ingeniería civil, requieren esencialmente la determinación precisa de las propiedades mecánicas del suelo para su correcta fundación. Por ello los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como su origen geológico, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga y otras. Estos estudios requieren que se lleven a cabo ensayos tanto in situ como en laboratorio a través de muestras extraídas del lugar.

Debido a que las propiedades del suelo están sujetas a una variación espacial y temporal; por medio de los métodos convencionales, la cantidad de puntos evaluados están limitados. Estos métodos además son invasivos, costosos y consumen un tiempo considerable.

Por ello determinar la relación entre una propiedad indirecta del subsuelo y relacionarla con el dato que se necesita conocer puede proporcionar un método económico, no invasivo y rápido que, debidamente parametrizado, ofrece ventajas sobre los métodos tradicionales. El problema surge en que la medición sobre el subsuelo de la resistividad con el fin de obtener algunos de sus parámetros geomecánicos es un campo de investigación poco estudiado y la bibliografía aporta pocos trabajos al respecto entre ellos los de Cosenza *et al.* (2006), Fahad *et al.* (2012) y Kowalczyk *et al.* (2014) y Filho *et al.*, (2017). Este estudio no trata sobre la aplicación convencional de los métodos geoelectrónicos en el sentido de interpretar capas resistivas correlacionables con la geología o hidrogeología local, sino que su objetivo principal es comenzar a estudiar las relaciones entre la resistividad del subsuelo y los parámetros geomecánicos de los mismos, aprovechando la experiencia lograda por los otros autores mencionados (op.cit.).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo en dos áreas de trabajos bien definidas

A. Área de estudio regional

Comprende una región ubicada en la zona oriental de la provincia de Entre Ríos, de norte a sur entre las localidades de Ayuí-Concordia-Puerto Yerúa y de este a oeste entre el margen occidental del río Uruguay y la ruta Nacional 14, en el Departamento de Concordia, Provincia de Entre Ríos, Argentina (Figura 1). La zona se encuentra en un área de transición entre el clima subtropical y templado sin estación seca durante el año. Las temperaturas medias son de 26°C en verano y 13°C en periodo de invierno, siendo la temperatura media anual de 20-21°C.

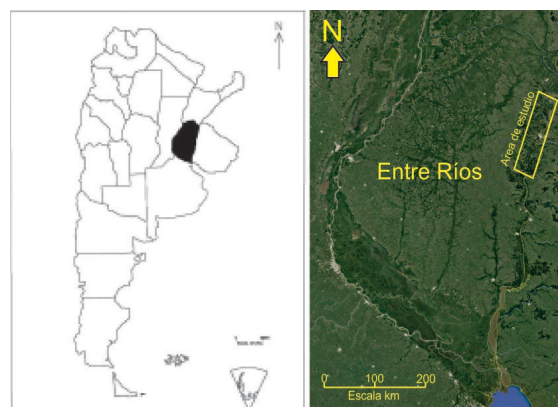


Fig 1: Localización del área de estudio.

B. Zona de estudio en detalle (ZED)

La ZED está ubicada en la zona sur del Parque Nacional El Palmar, más precisamente en la seccional La Capilla (Figura 2).



Fig. 2: Zona de estudio en detalle.

Este lugar cuenta con estaciones de monitoreo continuo de humedad y temperatura del suelo y medición del nivel freático (Figuras 3 y 4).



Fig. 3: Estación de monitoreo continuo de temperatura y humedad de suelo instalada en la cuenca del arroyo Palmar.



Fig. 4: Estación de monitoreo de nivel freático.

C. Estudio de campo exploratorio

Con la intención de reproducir el trabajo realizado por los diferentes autores citados en la tesis, los cuales mostraban resultados con diferentes posibilidades interpretativas, se realizaron sondeos eléctricos verticales paramétricos en puntos en los que se tenían datos regionales de estudios de mecánica de suelo (Figura 5).

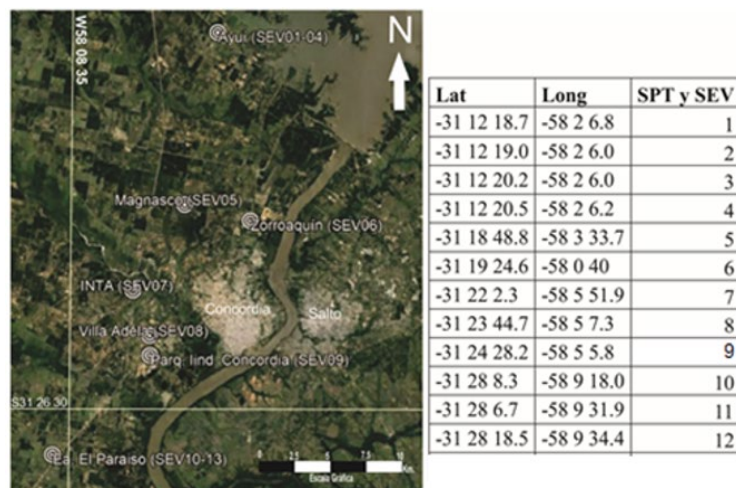


Fig. 5: Puntos paramétricos SPT y SEV y cuadro adjunto con las coordenadas de los mismos.

En Chury et. al. (2019), se presentó este primer intento de correlación entre los valores de las mediciones de resistividad eléctrica con parámetros geomecánicos del subsuelo, más precisamente con el número de golpes del ensayo de SPT. Ese estudio mostró, que existían buenas correlaciones locales entre los datos, pero no así en forma regional. A consecuencia de esto, se planteó la necesidad de complementar con ensayos de laboratorio.



D. Ensayos de laboratorio

Debido a que la resistividad eléctrica del suelo es una función compleja, de la resistividad del fluido que rellena sus poros, de su grado de saturación y temperatura, se realizaron una serie de experimentos con suelos seleccionados, variando su contenido de agua, carga salina y temperatura, para comprender mejor la interacción y el rango de variación entre las variables mencionadas.

Para medir la resistividad eléctrica en condiciones de laboratorio de las diferentes muestras de suelo utilizadas, se hizo uso del resistivímetro desarrollado. El resistivímetro fue conectado a una caja de suelos de iguales dimensiones que la caja estándar de Miller utilizada en estudios de corrosión en metales (ASTM G57).

Se realizaron diferentes tipos de ensayos sobre dos tipos de suelos con diferencias granulométricas bien marcadas (arena y grava) que fueron seleccionadas en laboratorio.

Además, se realizaron ensayos sobre muestras de arena con contenidos variables de arcilla.

Para los ensayos se utilizó agua destilada y se le incorporó cloruro de sodio hasta obtener una concentración salina de 14g/l (Muestra N° 1). Luego con esta solución se prepararon diferentes disoluciones agregando la cantidad suficiente de agua destilada (Muestras N°2 a N°8). Además, se utilizó agua natural del acuífero extraída del ZED (Muestra N°9).

Las características principales de los tipos de aguas utilizadas en cada experimentación se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 3: Características de las aguas utilizadas

Muestra	Origen del agua	Concentración
		ClNa (mg/l)
1	Laboratorio	14000
2	Laboratorio	7000
3	Laboratorio	3000
4	Laboratorio	1550
5	Laboratorio	730
6	Laboratorio	410
7	Laboratorio	250
8	Laboratorio	200
9	Acuífero	180

Para determinar la dependencia de la resistividad eléctrica con la temperatura, se realizó un primer ensayo con la muestra de arena seleccionada. Para ello se colocó la arena en un horno a una temperatura de 110°C, para realizar su secado, hasta la obtención de un peso constante (ASTM D-2216).

Posteriormente se pesó la caja de suelos vacía y se cubrió completamente su volumen con la arena salida del horno. Se pesó el conjunto para determinar el peso seco de la muestra.

Se procedió a incorporar la muestra de agua del acuífero, previamente calentada hasta una temperatura cercana a los 80°C, hasta saturar la muestra. Nuevamente se pesó el conjunto para poder determinar su contenido de agua.

La caja de suelos, con la muestra de arena saturada con el agua del acuífero se conectó al resistivímetro electrónico y estos elementos fueron llevados a un equipo de frío para hacer descender su temperatura y poder observar la variación de su resistividad eléctrica.

Se programó el resistivímetro para que realice las mediciones y almacenamiento en forma automática cada 10 segundos, tanto de la resistividad eléctrica de la muestra, como también de su temperatura. Este ensayo duró aproximadamente una hora.

Aplicando los mismos procedimientos mencionados anteriormente, se realizaron dos ensayos adicionales, uno de ellos utilizando la muestra de grava seleccionada en laboratorio y otro utilizando una muestra de suelo extraída del ZED a una profundidad de 50 centímetros.

Con respecto a las experimentaciones para estudiar la variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua, se realizaron utilizando la arena seleccionada en laboratorio.

Para ello se colocó la arena en un horno para realizar su secado según ASTM D-2216.

Posteriormente se pesó la caja de suelos vacía y se cubrió completamente su volumen con la arena salida del horno. Se pesó el conjunto para determinar el peso seco de la muestra.

A continuación, se mezcló esta arena con un poco de agua de la muestra N°1 y se la depositó en la caja de suelos. Se pesó nuevamente el conjunto para determinar el contenido de agua que tenía la muestra.

Se conectó la caja de suelos al resistivímetro y se realizó la medición de resistividad eléctrica (Se tomó la mediana de 15 mediciones).

Se extrajo la muestra de suelo de la caja y se le agregó más agua de la muestra N°1 y se repitió el procedimiento anterior. Todos estos pasos se reiteraron hasta que la muestra quedó totalmente saturada en agua.

Luego se realizó la misma metodología con las 8 muestras de agua restantes sobre nuevas muestras de arena.

Posteriormente se efectuaron experimentos siguiendo el mismo procedimiento, sobre las muestras de grava seleccionada en laboratorio y también, sobre muestras de arena-arcilla, pero para éstas últimas solamente utilizando el agua del acuífero.

Con los datos obtenidos de estos ensayos se pudo obtener familias de curvas de variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua y con diferentes salinidades para cada tipo de suelos.

E. Estudio de campo paramétrico

Este estudio, se llevó a cabo en el ZED, donde se eligieron cuatro puntos del terreno de acuerdo a lo indicado en la Figura 6.

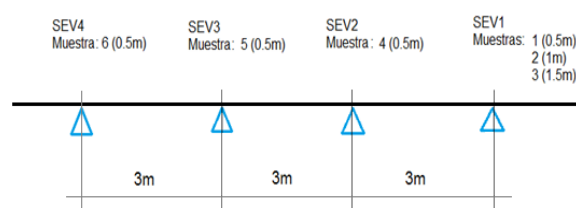


Fig. 6: Distribución de los puntos de estudios paramétricos.

Sobre estos puntos se realizaron sondeos eléctricos verticales (SEV) con la configuración electródica Schlumberger y con aperturas del tendido geoelectrico **AB** de 12 metros, consiguiendo de esta manera lecturas de la resistividad eléctrica aparente hasta los 3 metros de profundidad aproximadamente.

Una vez finalizado los SEV, se perforó el suelo y se extrajeron seis muestras mediante tubos delgados. Las herramientas para perforación y extracción de muestras fueron diseñadas y construidas para esta tarea.

Sobre las muestras extraídas del ZED, en el laboratorio de geotecnia “Carlos Micucci” de la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Concordia, se realizaron ensayos de caracterización, contenidos de arcilla y triaxiales no consolidados y no drenados.

Con los resultados de laboratorio sobre las muestras extraídas en el estudio paramétrico, se realizaron correlaciones con sus respectivas mediciones de resistividad eléctrica. Esto permitió obtener relaciones de entre las distintas variables mecánicas del suelo con su medición de su resistividad eléctrica en el punto.

F. Mapas geoelectricos

Algunas semanas más tarde de realizado el estudio de campo paramétrico, se realizó en el ZED, en un área delimitada de 9x6 metros, 12 sondeos eléctricos verticales con aperturas del tendido **AB** de 12 metros y cuya distribución se rige por una grilla de 3 filas por 4 columnas (Figura 7).

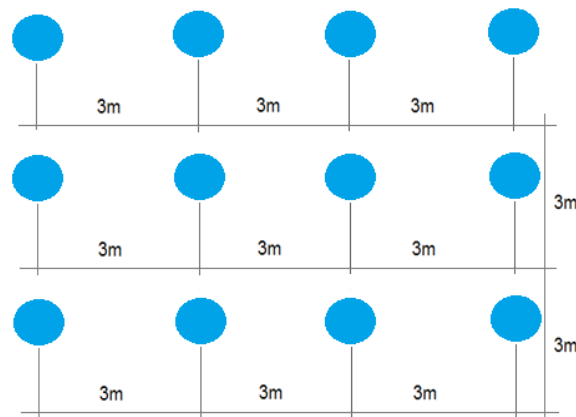


Fig. 7: Grilla de sondeos eléctricos verticales en el ZED.

Posteriormente, con la interpretación estos sondeos, o sea la obtención de las resistividades eléctricas reales y espesores de cada capa, se realizaron mapas geoelectricos 2D del subsuelo para 0.5, 1 y 1.5 metros de profundidad.

Con estos mapas se puede observar la distribución espacial de la resistividad eléctrica del subsuelo a las profundidades citadas.

G. Levantamiento mapa geomecánico

Con las funciones de correlación encontradas en el estudio de campo paramétrico en el ZED y aplicándolas a los datos obtenidos del mapa geoelectrico, se construyeron mapas geomecánicos del subsuelo para los diferentes parámetros mecánicos de suelo estudiados (contenido de finos, contenido de arcilla, ángulo interno de fricción, cohesión y contenido de humedad) y las profundidades en estudio.

H. Validación de los mapas geomecánicos

Con la disponibilidad de los mapas geomecánicos, se eligió un punto al azar del área de estudio en el ZED, donde se extrajo una muestra y se envió a laboratorio para realizar las determinaciones pertinentes (Figura 8).



Fig. 8: Levantamiento de muestra para validación.

III. RESULTADOS

El efecto de la variación de la resistividad eléctrica con la temperatura, sobre las cuatro muestras ensayadas, esto es, la de agua del acuífero, arena-agua acuífero, grava-agua acuífero y suelo-agua acuífero (éstas tres últimas saturadas), se muestra en la figura 9. Los puntos representan el conjunto de mediciones realizadas.

Para la obtención de estas cuatro curvas se realizaron aproximadamente un total de 1700 mediciones con un intervalo de 10 segundos entre cada una de ellas.

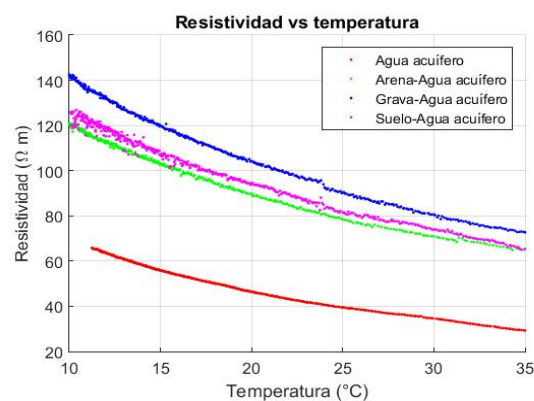


Fig. 9: Variación de la resistividad eléctrica con la temperatura en las cuatro muestras ensayadas.

De la observación de las curvas precedentes, se pudo notar que, al aumentar la temperatura de las muestras de suelo, su resistividad eléctrica disminuye. Dicha observación concuerda con lo expresado por otros autores (Zhou et. al., 2015) (Kouchaki, 2014).

Además, por medio del análisis de los datos, surge que una disminución de la temperatura de 25 ° C a 10 ° C, puede aumentar la resistividad eléctrica en aproximadamente un 50%. Esto también fue expresado en el trabajo de Kouchaki (2014).

Estas diferencias en las amplitudes térmicas, pueden encontrarse en los niveles no saturados del subsuelo, según los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo.

También estas diferencias aparecen inevitablemente al realizar mediciones tanto in situ como en laboratorio. Por ello es muy importante tenerlas en cuenta, refiriendo los valores de resistividades eléctricas medidas, a una temperatura en común al momento de interpretar las mediciones de campo utilizando los datos de laboratorio.

Los resultados experimentales obtenidos para determinar el comportamiento en la variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua y su carga salina, para los tres tipos de muestras de suelos utilizadas (Arena, grava y arena con arcilla), se pueden observar en las figuras 10, 11 y 12.

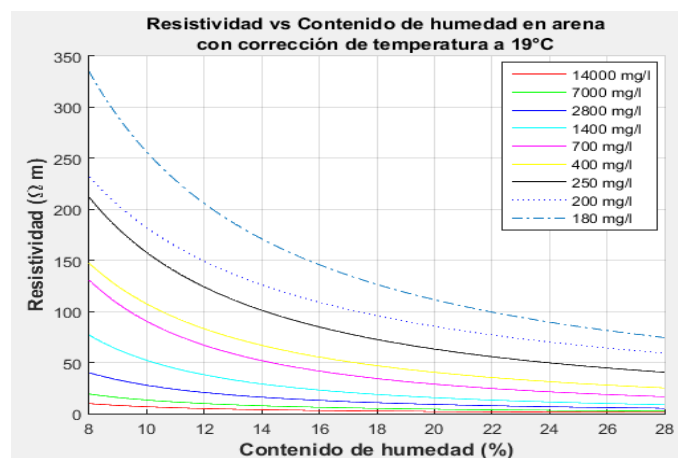


Fig. 10: Variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua para muestras de arena (expresado en mg. de ClNa).

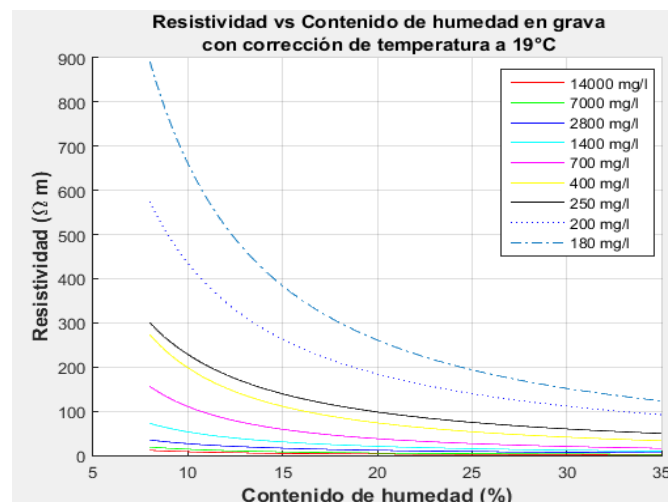


Fig. 11: Variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua para muestras de grava (expresado en mg. de ClNa).

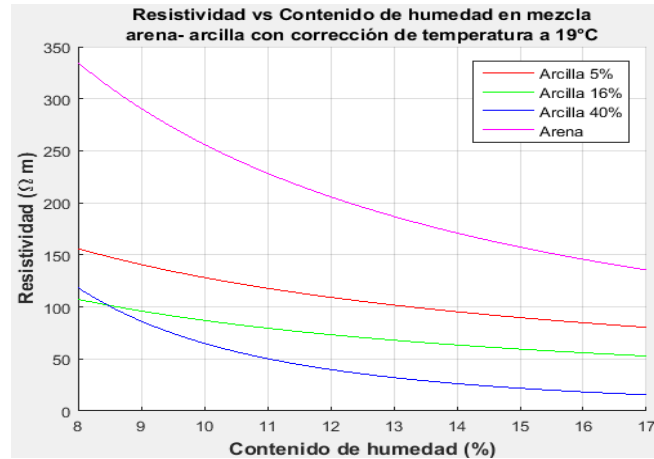


Fig. 12: Variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua para muestras de arena-arcilla.

De la observación de todas estas curvas, lo primero que se puede demostrar, es que un aumento en el contenido de agua del suelo resulta en una disminución en su resistividad eléctrica y además existe una buena correlación entre ellas. Estas conclusiones también fueron expresadas por (Sudhir et. al., 2014).

Otra aclaración interesante, es que todas las curvas se muestran a partir de un contenido de agua aproximado del 8%, ya que, por debajo de estos valores, la medición de la resistividad eléctrica resulta ser muy variable. Algunos autores, llaman a este punto, *humedad crítica*, y se lo atribuyen a la cantidad mínima de agua necesaria para mantener una película de agua continua que rodee a las partículas sólidas (Parkomenko, 2014) (Zhou et. al., 2015).

Además, de estas curvas, se desprende que la resistividad eléctrica de los suelos disminuye con la disminución de su porosidad. Afirmación también expresada en (Zhou et. al., 2015).

Como la disminución de la porosidad del suelo se debe a un aumento de material fino, se puede también expresar el párrafo anterior diciendo que los suelos con una textura fina tienen una resistividad eléctrica más baja que aquellos con textura más gruesa (Zhou, et. al., 2015) (Kazmi et. al., 2016).

Para el caso específico de los experimentos con muestras de arena, con diferentes porcentajes de arcilla (Figura 12) se puede observar que existe un comportamiento diferente de la curva de 40% de contenido de arcilla, con respecto a las demás. Esta curva genera un cruzamiento con la de 16% de contenido de arcilla que puede explicarse por el procedimiento de mezcla. Para este contenido de arcilla y con bajo contenido de agua menor al 9%, es muy difícil lograr humedecer homogéneamente toda la muestra, ya que se generan grumos en todo su volumen. Al aumentar el contenido de agua por encima de este valor la muestra se vuelve homogénea y la tendencia de su variación acompaña a las demás curvas.

En la tabla 2 se muestran los datos experimentales obtenidos del estudio paramétrico realizado en el ZED. En la misma se puede observar los parámetros mecánicos del suelo y las interpretaciones de las resistividades eléctricas verdaderas. Estas mediciones se realizaron con una temperatura del suelo de 20.7°C a una profundidad de 1.2 metros.

Tabla 2: datos experimentales zed

	Profundidad	Resistividad medida	Contenidos finos	Contenido arcilla	Ángulo fricción	Cohesión	Humedad Natural
Muestra 1	0.5	6.84	47.14	37	5	0.5	23.46
Muestra 2	1.0	17.9	34.62	26	14	0.95	12.9
Muestra 3	1.5	57.1	22.67	17	20	0.6	12
Muestra 4	0.5	9.12	46.1	37	5	0.5	23.6
Muestra 5	0.5	5.6	47.78	32	5	0.5	29.2
Muestra 6	0.5	4.46	40.37	32	6	0.35	18.8

Con los datos presentados, se realizaron las correlaciones entre la resistividad eléctrica del subsuelo a la profundidad de cada una de las muestras extraídas, con sus respectivos parámetros mecánicos, obteniéndose las siguientes curvas (Figura 13) (Figura 14) (Figura 15) (Figura 16) y (Figura 17).

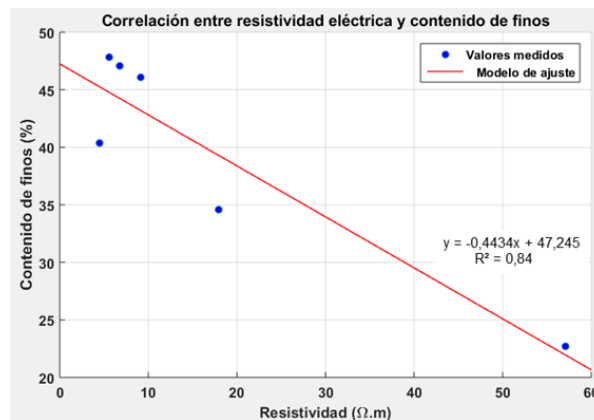


Fig. 13: Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su contenido de finos.

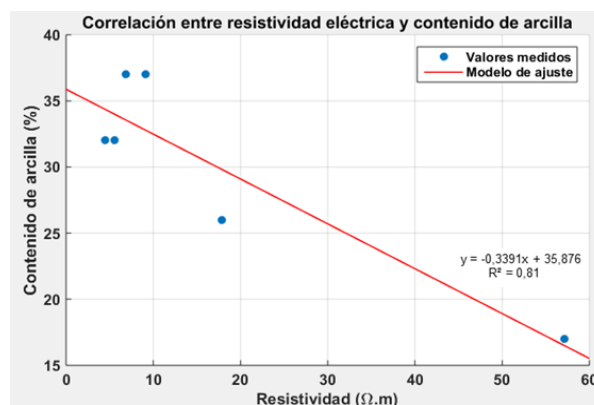


Fig. 14: Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su contenido de arcilla.

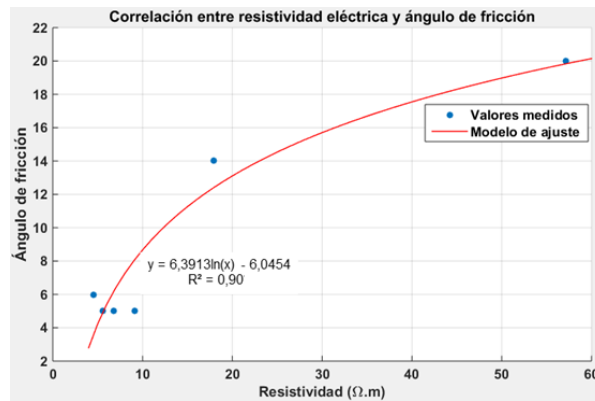


Fig.15: Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su ángulo interno de fricción.

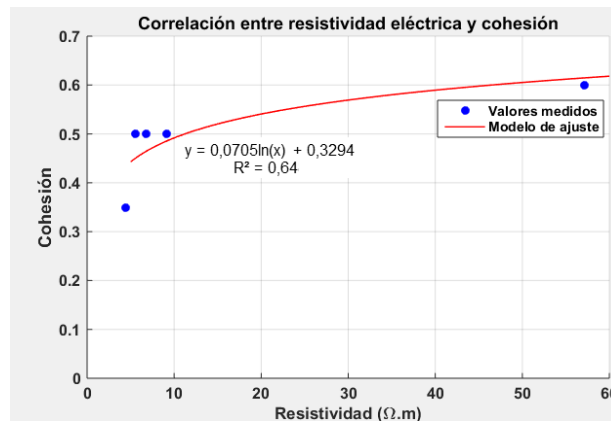


Fig. 16: Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su cohesión.

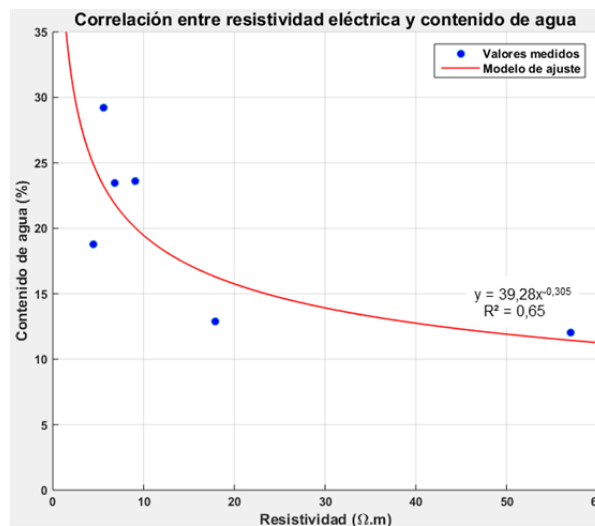


Fig.17: Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y contenido de agua.

Con respecto a la figura 13, se puede apreciar que al aumentar el contenido de finos (pasante tamiz N°200, limos y arcillas), la resistividad eléctrica disminuye y su coeficiente de determinación $R^2 = 0.84$ muestra una muy buena dependencia entre ellos. La presencia de material fino mejora la gradación del suelo (mejorando su capacidad portante), al mismo tiempo el material fino tiende a aumentar los puntos de contactos de forma tal que disminuiría su resistividad eléctrica porque se está aumentando la superficie de contacto.



De la figura 14, se puede observar que, al aumentar el contenido de arcilla (tamaño inferior a $2\mu\text{m}$), la resistividad eléctrica disminuye. Aquí también se puede señalar una muy buena relación entre dichas variables y con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.81$.

Un dato importante es que los antecedentes disponibles en la bibliografía no incluyen estas dos últimas relaciones, es decir, entre la resistividad eléctrica y el contenido de finos y la resistividad eléctrica y el porcentaje de arcilla. En este trabajo se considera que siendo el material fino y las arcillas dos elementos claves para comprender la cohesión de los suelos no debe pasarse por alto el análisis resistivo diferenciado de los mismos. Las correlaciones de ambos parámetros en este caso resultan significativamente similares, no obstante, en otro tipo de suelos con una mineralogía de arcillas diferentes podría no presentar correlaciones coincidentes.

Con respecto a la figura 15, se puede observar que el valor del ángulo interno de fricción se incrementa con el aumento de la resistividad eléctrica y su coeficiente de determinación $R^2 = 0.90$ es altamente significativo. Estas mismas apreciaciones fueron realizadas en (Siddiqui et. al., 2012) y (Jusoh et. al., 2017).

De la figura 16 se puede observar que la cohesión se incrementa con el aumento de la resistividad eléctrica y su coeficiente de determinación $R^2 = 0.52$ es significativa.

La cohesión es una propiedad de los suelos que depende de dos factores, atracción debida al tamaño de partícula (ley de Haynes) y atracción debida a la incorporación de cationes por parte de los minerales de arcilla (ley de Russel).

La interpretación propuesta por Jusoh (2017) explicando variaciones resistivas sobre la base de aumento de tamaño de partículas (menos finos) alude a la ley de Haynes y puede explicar este fenómeno en algunos suelos. No obstante, no debe olvidarse la respuesta "capacitiva" que ofrecen los minerales de arcilla. Estos últimos sometidos a un campo eléctrico pueden cargarse diferencialmente dependiendo del tipo mineralógico de arcilla presente en los finos. Sería dable esperar diferente comportamiento resistivos para diferentes tipos mineralógicos de arcilla. Esta hipótesis, que alude a la ley de Russel, puede explicar los resultados dispares de las correlaciones propuestas por los diferentes autores (op. cit.) e incluso explicaría la correlación logarítmica significativa ($R=0.64$) que se observa en este estudio. A semejanza de la curva de carga del capacitor, siendo este aspecto el fundamento de los estudios de suelos por medio de la polarización inducida.

Con respecto a la figura 17 se muestra que la resistividad eléctrica del suelo disminuye conforme aumenta su contenido de agua como fue empíricamente demostrado en laboratorio. Entre estas variables se observa una buena correlación potencial con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.65$. Esto, también fue fundamentado en (Siddiqui et. al., 2012) (Ozcep et. al., 2009) (Sudhir et. al., 2014) (Jusoh et. al., 2017). En resumen, esta correlación será más o menos significativa dependiendo del contenido de humedad, de alcanzar la saturación y del contenido salino del agua, incluso, de la interacción de todos estos factores entre sí. Es en cierta forma parte del fundamento, junto con la matriz del suelo, de las interpretaciones de métodos geoelectrónicos.

A partir de los doce sondeos eléctricos verticales realizados en el terreno se obtuvo un modelo de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo para las profundidades de 0.5, 1 y 1.5 m. En la figura 18 se aprecia para el caso de 1m de profundidad.

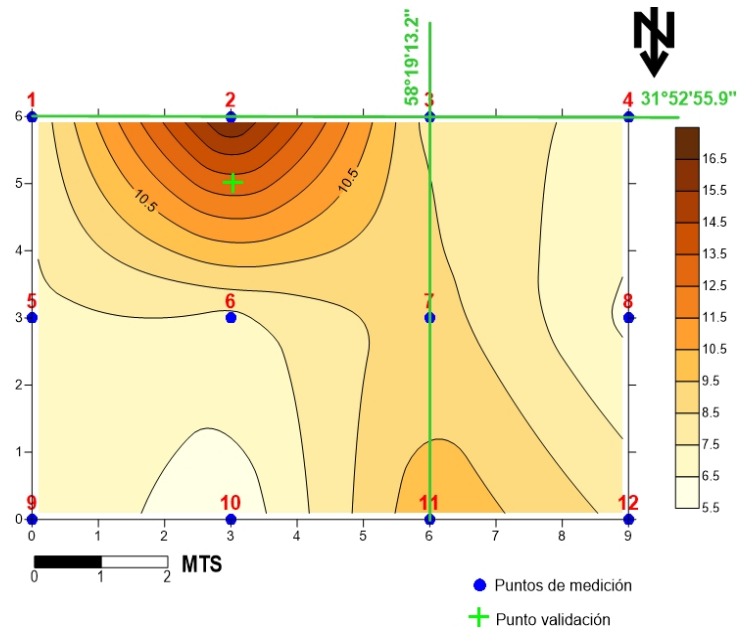


Fig. 18: Resistividad eléctrica del terreno a 1 m de profundidad.

Mediante el uso de estos mapas geoelectrónicos y por medio de las correlaciones obtenidas entre la resistividad eléctrica y los parámetros geomecánicos obtenidos, se realizaron mapas con la distribución espacial del contenido de finos, contenido de arcilla, ángulo interno de fricción, cohesión y contenido de agua para las profundidades de 0.5, 1 y 1.5 m. (Figura 19, 20, 21, 22 y 23).

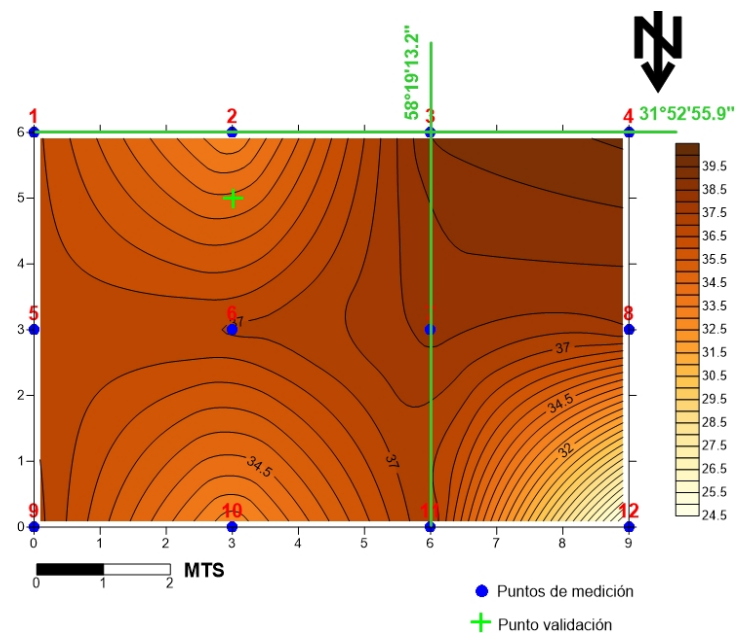


Fig. 19: Distribución espacial del contenido de finos a 1 m de profundidad.

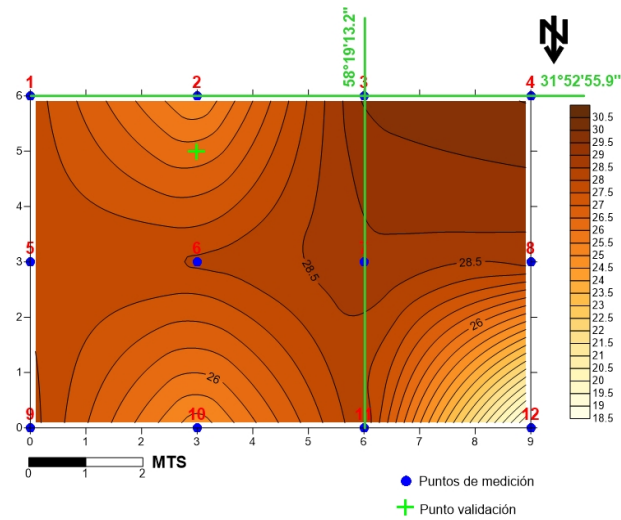


Fig. 20: Distribución espacial del contenido de arcilla a los 1 m de profundidad.

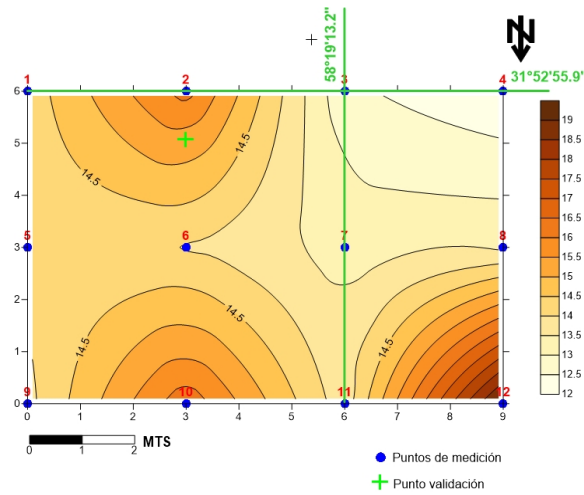


Fig. 21: Distribución espacial del ángulo interno de fricción a 1 m de profundidad.

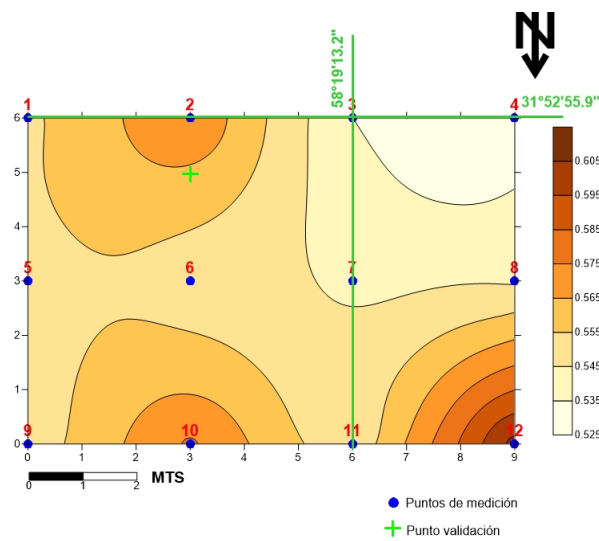


Fig. 22: Distribución espacial de la cohesión a 1 m de profundidad.

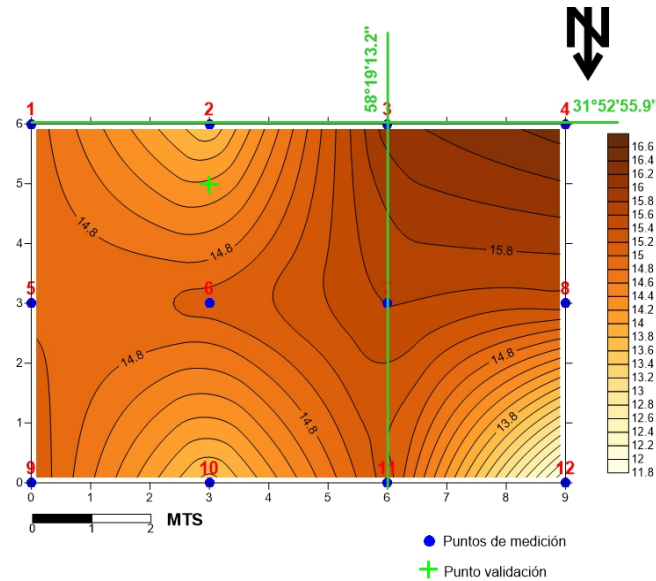


Fig. 23: Contenido de humedad a 1 m de profundidad.

De acuerdo con lo expresado anteriormente con la muestra que se extrajo del ZED al azar, se validaron las estimaciones generadas en estos modelos.

La tabla 3 muestra la comparación entre las determinaciones hechas en laboratorio sobre la muestra extraída del ZED con los valores geomecánicos.

Tabla 3: Validaciones modelos geomecánicos

Parámetro	Determinación de laboratorio	Estimación del modelo	Error relativo
Contenido de finos	41,50%	41,40%	-0,24%
Contenido de arcilla	32,00%	31,40%	-1,87%
Ángulo interno de fricción	9,00%	9,90%	10,00%
Cohesión	0,65%	0,50%	-23,07%
Contenido de agua	17,70%	18,50%	4,51%

IV. CONCLUSIONES

El uso de métodos geoelectricos para la caracterización de suelos con énfasis en aplicaciones geotécnicas y mecánicas de suelos ha sido poco utilizado a nivel mundial, solo algunos artículos han mostrado su interés al intentar relacionar algunos registros de resistividad con condiciones geológicas y/o geotécnicas (Arias, 2011).

Esta tesis aborda una investigación sobre las relaciones entre parámetros geomecánicos de los suelos como el contenido de finos, contenido de arcilla, ángulo interno de fricción, cohesión y el contenido de agua, con mediciones de resistividad eléctrica en campo como metodología para su estimación.

Se confirma la hipótesis de que es posible estimar cuantitativamente los parámetros geomecánicos mencionados analizando su comportamiento geoelectrico tanto en campo como en laboratorio. En tal sentido, conociendo que el subsuelo es un medio conductor, en mayor o menor medida, y que esto tiene relación no solo con la humedad relativa sino con la matriz sólida del mismo, este estudio busca establecer un modelo de correlación de este comportamiento. Esta



metodología es perfectamente replicable en cualquier unidad geológica atendiendo a las premisas y consideraciones llevadas adelante a lo largo de esta tesis.

V. REFERENCIAS

- Arias, D., Echeverri, O., Hoyos, F. (2012). *Relaciones Geoeléctricas en la Exploración Geotécnica*, Boletín de Ciencias de la Tierra, 31, 39-50.
- Chury, M., Silva Busso, A., Riccardi, G. (2019). *Modelo de distribución resistivo del subsuelo y sus aplicaciones en ingeniería geológica, cuenca del arroyo palmar, Entre Ríos*. I Jornadas de Doctorandos de la UTN Regional Concordia. Concordia – Argentina.
- Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y. J., Tabbagh, A., Charlery, Y. (2006). *Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France*. Journal of Applied Geophysics, 60, 165-178.
- Fahad, I. S., Syed, B. A. (2012). *Integrating geoelectrical and geotechnical data for soil characterization*. International journal of applied physics and mathematics, 2(2).
- Filho A., Oliveira M., Pires, T., Alves, A., Calixto, A., Narciso, M. (2017). *Correlation method of physical characteristics with electrical properties of soil*. Transactions on environment and electrical engineering, 2(2), 16-24.
- Jusoh, H., Osman, S. (2017). *The Correlation Between Resistivity and Soil Properties as an Alternative to Soil Investigation*, Indian Journal of Science and Technology, 10, (6), 1-5.
- Kazmi, D., Qasim, S., Siddiqui, F., Azhar, S. (2016). *Exploring the Relationship Between Moisture Content and Electrical Resistivity for Sandy and Silty Soils*, International Journal of Science Invention, 5, (7), 42-47.
- Kouchaki, B. (2017). *Laboratory resistivity measurements for soil characterization*. Tesis maestría, University of Arkansas, Arkansas, Estados Unidos.
- Kowalczyk, S., Maslakowski, M., Tucholka, P. (2014). *Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compactation*. Journal of applied geophysics, 110, 43-50.
- Parkomenko, E. (1967). *Electrical Properties of Rocks*. Boston: ed. Springer, 314p.
- Siddiqui, F., Osman, S. (2012). *Integrating Geo-electrical and Geotechnical Data for Soil Characterization*, International Journal of Applied Physics and Mathematics, 2, (2), 104-106.
- Zhou, M., Wang, J., Cai, L., Fan, Y. Zheng, Z. (2015). *Laboratory Investigation on Factors Affecting Soil Electrical Resistivity and the Measurement*, IEEE Transactions on Industry Applications, 51, (6), 5358-5365.



Ensayos sobre pastas y morteros para el diseño de mezclas de hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero.

Doctorando: Ing. Alberto José Palacio

*Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad
(CINTEMAC), UTN F.R.C.*

*Grupo de Investigación de Ingeniería Civil Materiales y Ambiente (GIICMA), UTN
F.R.Concordia.*

apalacio@frcon.utn.edu.ar

Director: Dra. Ing. Bárbara Belén Raggiotti, UTN- FRC.

Codirector: Dra. Ing. Viviana Rougier, UTN- FRCU.

Resumen: Se presentan los resultados de ensayos desarrollados en pastas y morteros, para analizar la influencia de los parámetros más importantes en la mezcla de hormigón alivianado autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de acero (HLAARFA). Se desarrollaron pastones para determinar la influencia del tipo de cemento sobre la fluidez de mezclas con aditivos superfluidificantes, en busca de diseñar un método de dosificación para HLAARFA en nuestro país. Se utilizó un cemento portland normal (CPN), un cemento compuesto (CPC), un cemento con filler (CPF) y una ceniza volante tipo F (CV). El estudio incluyó el tiempo de flujo de pastas en el cono de Marsh, medición del diámetro de flujo de asentamiento sobre pastas y morteros, y determinación del tiempo de flujo del embudo en V para morteros. Los ensayos se desarrollaron para mezclas con una relación agua-aglomerante de 0,33, aditivos reductores de agua de alto rango. Se combinaron metodologías de diversos investigadores y su rendimiento se valida a través de resultados en pruebas de laboratorio. Se pueden identificar los parámetros influyentes en el diseño de la mezcla y sus interacciones, lo que es de gran utilidad para elaborar el protocolo de prueba necesario para la dosificación de HLAARFA.

Palabras clave: Hormigón liviano autocompactante, reología de pastas, morteros, fibras de acero, Agregados livianos, dosificación.



I. INTRODUCCIÓN

El hormigón liviano autocompactante (HLAC) es un tipo de hormigón de alta performance que combina las características de desempeño del hormigón autocompactante (HAC) y el hormigón de agregado liviano (HL). Por otro lado, la adición de fibra es una forma efectiva de resolver la fragilidad y mejorar la resistencia al agrietamiento en hormigones (Rodríguez Lozano et al., 2013). Por lo tanto, la combinación de la tecnología del HLAC y del HACRF para preparar hormigón liviano de alta resistencia autocompactado y reforzado con fibras de acero (HLAARFA) es muy atractiva ya que la fibra puede restringir la flotabilidad o el hundimiento del agregado y reducir la segregación y el riesgo de exudación en la mezcla (Klein et al., 2011). Es así que el HLAARFA tiene una amplia perspectiva de empleo, especialmente como refuerzo de elementos de hormigón armado, a los efectos de mejorar su resistencia a flexión (Holschemacher et al., 2014).

Debido a la composición compleja de los constituyentes del HLAARFA, la propiedad de baja densidad acompañada de la autocompactación, y la contradicción entre cohesión y fluidez, es difícil diseñar este tipo de hormigones. El HLAARFA es desarrollado sobre la base del HLAC y del HACRF, por lo tanto, el método de diseño de mezclas de éstos puede usarse como referencia para el diseño de mezclas de HLAARFA (Palacio et al., 2020). El HLAC incluye principalmente el método de diseño empírico de punto óptimo de empaquetamiento y criterios de trabajabilidad, el método basado en la teoría del exceso de pasta, el basado en el modelo factorial estadístico, y el método basado en el modelo reológico de la pasta (Ting et al., 2019). En cuanto a los métodos de diseño de mezclas de HACRF, incluyen principalmente el basado en el espesor de la pasta y la teoría del relleno (Khayat et al., 2014), el método basado en las características reológicas de la pasta (Ferrera et al., 2007) y el método basado en la composición óptima de pasta (Pereira et al., 2004). Muchos criterios de dosificación se han planteado, sin embargo, a conocimiento del autor, no existe un método de diseño de mezcla especial ni una especificación técnica para HLAARFA.

El presente trabajo forma parte de un estudio más amplio que busca proponer un método de diseño de mezclas de HLAARFA con aplicabilidad amplia empleando los equipos y materiales disponibles en la región. Se recogen los resultados de una serie de ensayos realizados sobre pastas, elaboradas con diferentes tipos de cementos locales y distintos aditivos superfluidificantes, mediante la aplicación del cono de Marsh. La segunda serie de ensayos de extendido empleando un molde troncocónico y el embudo en V, para valorar la fluidez y viscosidad de los morteros. El estudio busca determinar, de forma cuantificable, el contenido de aditivo para cada tipo de cemento, como también evaluar en forma comparativa la variación de la fluidez en el tiempo para diferentes combinaciones de material cementicio y aditivo, con el fin de optimizar las mezclas para la obtención de un HLAARFA.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ensayos sobre pastas y morteros

En la Universidad Politécnica de Cataluña, Gomes et.al. (2002) han utilizado los ensayos de Cono de Marsh y mini-slump para definir la composición óptima de la pasta utilizada para fabricar un hormigón autocompactante de alta resistencia, así como también para determinar la compatibilidad entre cementos y aditivos. Mediante el cono de Marsh con apertura de salida de 8 mm (Figura 1) se analiza la fluidez de las pastas. En este caso el procedimiento consistió en introducir 800 ml de pasta en el cono y medir el tiempo (T) que tarda en fluir una cantidad de 200 ml de la misma. Para obtener cada valor de T se realizaron tres mediciones y se informa el promedio

del tiempo de paso. Para la elaboración de las pastas se utilizó una mezcladora Alein con dos velocidades de mezclado, 125 rpm (alta) y 62 rpm (baja). Se evaluó la fluidez luego de transcurridos 10 minutos y 60 minutos del contacto entre el agua y los materiales para detectar casos de incompatibilidad entre ligantes y aditivos.

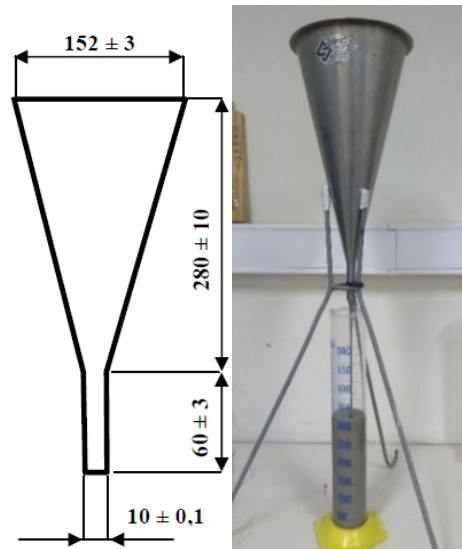


Fig. 1: Dimensiones y ensayo cono de Marsh

Posteriormente, basándose en el procedimiento de diseño para HAC definido por la EFNARC (2005), se realizó la determinación de la relación agua-material cementicio (a/mc), con el fin de obtener la demanda de agua del cemento o su mezcla con adiciones. Para hallarlo, se realizaron sucesivos ensayos de flujo de asentamiento empleando un molde troncocónico de 60 mm de altura, con diámetros superior e inferior iguales a 70 mm y 100 mm respectivamente. Se emplean relaciones V_a/V_{mc} arbitrarias que luego se grafican vs diámetro de flujo relativo (Γ_m), el cual se calcula en función de los diámetros de extendido obtenidos. Con estos datos se determina la relación βP que es la demanda de agua para el comienzo de flujo.

Para evaluar las características del mortero, Okamura (2000) propuso la utilización de dos ensayos. El primero es el ensayo de flujo (utilizando el cono descrito previamente). El resultado se expresa por medio del parámetro G_m . Para determinarlo se ubica el cono sobre una superficie lisa y nivelada, se llena con el mortero, se enrasa y se levanta suavemente. Finalmente se mide el diámetro de la huella de mortero y en función de éste se determina el parámetro. El segundo ensayo, denominado Embudo en V para morteros (Figura 2). Del mismo se obtiene el tiempo T (en segundos) que tarda la muestra en fluir a través del embudo. El resultado se expresa por medio del parámetro R_m que es función del tiempo de escurrimiento. Altos valores de G_m indican una gran capacidad de deformación y bajos valores de R_m indican una alta viscosidad de la mezcla. Algunos autores determinaron que estos ensayos tienen buena correlación con los dos parámetros reológicos, de tensión de corte umbral (τ_0) y viscosidad plástica (μ) (Mahdikhani, 2015). En base al criterio definido por Okamura y EFNARC se establece que un valor adecuado en estos ensayos son un tiempo de flujo entre 7 y 11 segundos y diámetros de escurrimiento de 250 mm. En este caso, manteniendo constante la relación a/mc , se utilizó una relación volumétrica del agregado fino respecto del mortero de 0,40. Esto es debido a que relaciones mayores a 0,50 traen aparejados riesgos de bloqueo y excesiva viscosidad plástica (Fava, 2003).

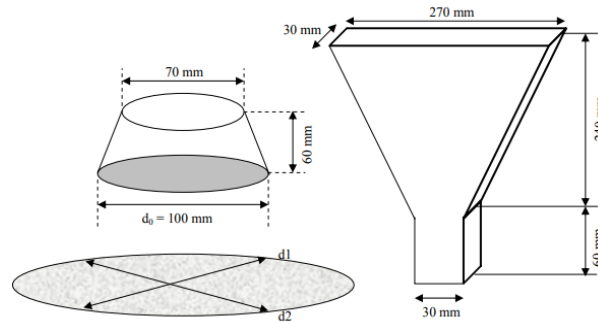


Fig. 2: Dimensiones cono de flujo de mortero y embudo en V.

B. Materiales y mezclas

En este estudio se utilizaron tres tipos de cementos de uso general en la región, un cemento portland compuesto (CPC40, IRAM 50000), un cemento portland con “filler” calacáreo (CPF40, IRAM 50000) y un cemento portland normal (CPN40, IRAM 50000). Sobre los cuales se realizaron los ensayos de caracterización establecidos por Norma IRAM 50000/1, presentados en la Tabla 1. Como material cementicio suplementario se empleó una ceniza volante tipo F, con una finura Blaine de 241 m²/kg, una densidad de 2,15 gr/cm³ y un índice de actividad puzolánica con cemento normal de 110 % a 28 días, según Norma IRAM 1654-1. El contenido en peso adoptado de ceniza volante incorporado en los ensayos fue de 20 %, debido a que, diversas publicaciones realizadas sobre morteros y hormigones especiales, mostraron que estos contenidos producen buenos niveles resistentes (Mamirov, 2019).

Los aditivos empleados fueron reductores de agua de alto rango (RAAR), también conocidos como aditivos de 3^a generación, de dos marcas diferentes con bases químicas de policarboxilatos y polímeros sintéticos modificados. Estos fueron identificados con las letras A y B según su marca y con un número correlativo y sus dosis son expresadas siempre como contenido líquido referido al peso de cemento.

Tabla 4: Características de los cementos empleados.

Designación	F. Blaine [cm ² /g]	Densidad [g/cm ³]	Res. Comp. [MPa]	
			2 días	28 días
CPN40	3667	2,99	20,56	40,24
CPC40	4165	3,08	19,66	47,45
CPF40	4293	2,98	13,69	35,03

III. RESULTADOS

C. Relación mínima Va/Vmc para flujo cero

Se la mínima relación a/mc en volumen necesaria para que la pasta comience a fluir. En los ensayos para pastas elaboradas con cemento el promedio de este valor fue 0,18, y en pastas con un 20% de reemplazo en masa por ceniza volante de 1,13. Estos resultados demostraron una menor demanda de agua por parte de la pasta con reemplazo de ceniza debido a la forma esférica de sus partículas, coincidente con los informado en la literatura (López & Castro, 2010). Esto es importante

ya que se puede lograr igual trabajabilidad con menores relaciones a/mc o un menor contenido de aditivo reductor de agua.

D. Compatibilidad cemento-aditivo superfluidificante

Se analizó el tiempo de escurrimiento y la pérdida de fluidez en el tiempo para una relación a/c predeterminada de 0,33 en peso. En la Figura 3 puede observarse las gráficas que permiten obtener el valor de la dosis de saturación y la compatibilidad de los cementos con cada aditivo. Se observa que, para una dosificación que excede el punto de saturación la curva de flujo es relativamente plana ya que no hay una disminución notable en el tiempo de flujo. De todos los gráficos, el CPC40 mostró un tiempo de flujo más bajo en esta relación a/c para la mayoría de los aditivos. La fluidez mejora con el aumento de la dosis de superplastificante, debido a la mayor capacidad de dispersión (Ajay et al. 2020). Sin embargo, a medida que se aumentaba su dosis más allá del punto de saturación, las posibilidades de segregación eran predominantes y también la pasta presentaba mayor comportamiento tixotrópico. El CPC y CPF, que tenían mayor finura, mostraron una menor fluidez y dosis de saturación más altas en comparación con el sistema CPN. La mayor compatibilidad se manifiesta con los aditivos SP-A2 y SP-A3, donde las curvas de 10 minutos de asemejan mucho a las de 60 minutos y el punto de saturación queda claramente definido. Cabe mencionar que al emplear los aditivos SP-B1 y SP-B2 se presentaba muy baja fluidez, siendo imposible su determinación a los 60 minutos del mezclado. Esto muestra indicios de incompatibilidad con estos cementos para la relación a/c empleada.

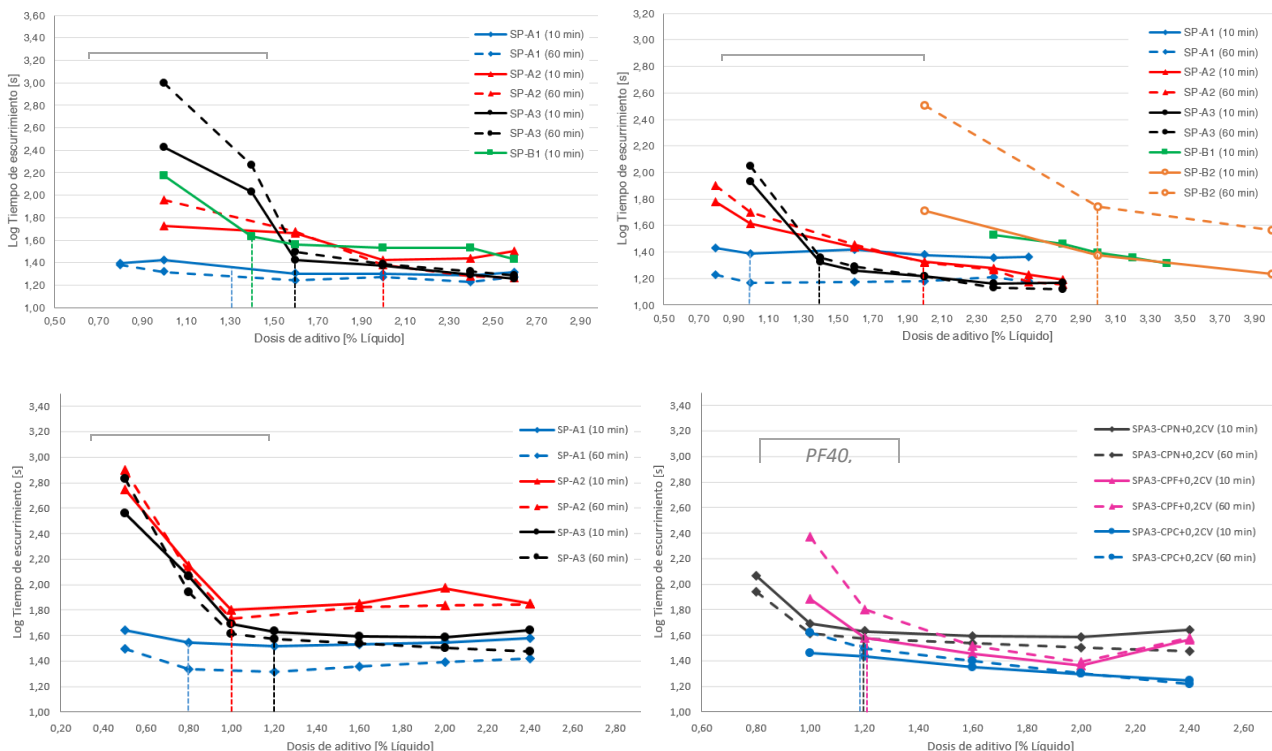


Fig. 3: Curvas de flujo obtenidas en pastas empleando los aditivos en estudio para una relación a/c de 0,33.



E. Resultados de los morteros estudiados

Hasta el momento se realizaron 13 mezclas de mortero elaboradas con el aditivo SP-A3 y los cementos CPC40 y el CPF40. En estas mezclas se buscó ajustar la dosis de aditivo, la relación a/mc, el contenido de CV y la proporción de AF/AG para obtener los valores recomendados. Empleando la relación a/mc de 0,33, 20% de CV y 40% de agregado fino, el cumplimiento del diámetro de extendido se logró para una dosis de aditivo del orden de 0,40, pero no fue posible lograr el tiempo de vaciado recomendado. Para aumentar el tiempo en el embudo en V, se incrementó levemente el contenido de arena a 45% y el de ceniza volante al 25%, en base a lo informado en literatura (Khaleel & Razak, 2013).

Se observa que, como es lógico a medida que aumenta la dosis de aditivo se produce un aumento de R_m y G_m así como también al aumentar la relación a/mc y, en menor medida, al incrementar el porcentaje de CV. Por otro lado, el aumento de agregado finos en la mezcla reduce el valor de G_m , esto podría deberse a que, la capa de pasta alrededor de las partículas de arena se reduce y, por lo tanto, aumenta la fricción entre las partículas. De los resultados obtenidos, surge que las mezclas que se acercaron mejor a los parámetros buscados son las M-4, M-9 y M-10. Sin embargo, es necesario continuar las evaluaciones para mejorar el ajuste a las pautas de diseño sobre todos los cementos.

IV. CONCLUSIONES

Se presentaron las experiencias realizadas hasta el momento, vinculadas con el estudio sobre pastas y morteros para determinación de la influencia del tipo de cemento sobre la fluidez de mezclas con aditivos superfluidificantes en busca de desarrollar un método de dosificación para HLAARFA. Las principales conclusiones se indican a continuación:

Los cementos con adiciones presentan una menor dosis de saturación, pero presentan una menor fluidez que la obtenida con el cemento CPN, poniendo de manifiesto la mayor cohesión de las pastas, lo que también se apreció visualmente. Para cada tipo de cemento las dosis de saturación determinadas en pastas presentaron una ligera tendencia a crecer en los morteros. Además, como resultado del agregado de ceniza en sustitución por el cemento, se logró una reducción en el contenido de aditivo superfluidificante requerido.

La relación a/mc constituye una variable muy importante en el comportamiento de las mezclas, así como la superficie específica del cemento que afecta la capacidad de retención y fijación del aditivo, pero también existen otras variables como la composición mineralógica del cemento y la distribución granulométrica del agregado fino que modifican las propiedades reológicas de las mezclas. Debido a esto se debe continuar el estudio sobre morteros con el fin de poder evaluar los cambios producidos por la modificación de los materiales empleados.

Para el diseño de la familia de HAC resulta importante el estudio sobre pastas, principalmente para verificar la compatibilidad entre los cementos y con las adiciones y los aditivos a emplear. Esto permite definir en primera instancia las dosis de aditivos, el porcentaje de adiciones, la relación a/mc y granulometría de la arena, como un punto de partida para comenzar los ajustes en hormigones permitiendo un ahorro de tiempo y materiales en el proceso de dosificación.



V. REFERENCIAS

- Athira Ajay et al (2020) A study on compatibility of superplasticizers with high strength blended cement paste IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 491 012043.
- EFNARC (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use. SCC 028.
- Fava, Carlos A.P. (2003) Hormigón autocompactante: Desarrollo y caracterización. Tesis magíster. UNCPBA. Facultad de ingeniería. <https://www.fio.unicen.edu.ar/images/stories/carreras/posgrado/hormigon/tesis/TesisFava.pdf>
- Ferrara, L., Park, Y.D., Shah, S.P. "A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete", Cement and Concrete Research 37 (2007) 957–971.
- Gomes, P.C.C., Gettu, R., Agulló, L., Bernad, C. (2002). Mixture Proportioning of High Strength Self-Compacting Concrete. Using Simple Test Methods." 3º Int. Conference on High Performace Concrete, and Quality of Concrete Structures. 1-4.
- Holschemacher, K., Müller, T., Kieslich, H. (2014) Flexural behavior of high-strength concrete with combined steel fiber and bar reinforcement. Proceedings of the International Seminar on Advanced Concrete Technology and its Applications, 45–51.
- Khaleel, O. R., & Razak, H. A. (2013). Mix Design Method for Self Compacting Metakaolin Concrete with Different Properties of Coarse Aggregate. Journal of Materials & Design.
- Khayat, K. H., Kassimi, F., Ghoddousi, P. "Mixture Design and Testing of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete" ACI Materials Journal, Title No. 111-M13 (2014) 143-151.
- Klein, N.S., De la Fuente, A., Aguado, A., Maso, D. (2011). Lightweight self-compacting concrete reinforced with fibres for slab rehabilitation. Mater. Construcc. 61 239–256.
- López, M., & Castro, J. T. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. Revista Ing. de Construcción, 25(3), 13.
- Mahdikhani, M., & Ramezani pour, A. (2015). New methods development for evaluation rheological properties of self-consolidating mortars. C. and Building Materials, 75, 136–143.
- Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi, M. (2000) Self-Compacting Concrete. Structural Concrete, V.1, Nº1, [3 – 17].
- Palacio, A.J., Raggiotti, B.B., Rougier, V. C. (2020). Hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero. Análisis del avance en el desarrollo del diseño de mezclas. 23a Reunión Téc. AATH, La Plata, Argentina.
- Pereira E.B., Barros J.A.O., Ribeiro A., Cunha V.M., Antunes J.A.B. (2004). Self-compacting steel fibre reinforced concrete for precasted sandwich panels-experimental and numerical research. Proceedings BeFib 2004, 15-17. Ancona, Italy
- Rodríguez Lozano, J. J., Segura Vicent, E. (2013). Análisis comparativo del efecto de los distintos tipos de fibras en el comportamiento post fisura del hormigón reforzado con fibras. Proy. final de grado. U. Politécnica de Valencia. España. 1–88.



Ting, T.Z.H., Rahman, M.E., Lau, H.H., Ting, M.Z.Y. (2019). Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 201. 763–77.



Modelo numérico para el hormigón reforzado con fibras híbridas: Aplicación a un caso de estudio.

Doctorando: Miqueas C. Denardi

UTN – Facultad Regional Concordia

miqueasdenardi@gmail.com

Director: Mario R. Escalante.

Codirector: Viviana C. Rougier.

Resumen: Las vigas de gran altura (VGA) son utilizadas en numerosas estructuras tales como edificios de altura y fundaciones, entre otras. Se ha demostrado que el uso de fibras de acero e híbridas (mezcla de fibras de acero y polipropileno) como refuerzo en el hormigón proporciona un mayor control de fisuración e incremento de la tenacidad. Por ello, el uso de las fibras híbridas, en reemplazo total o parcial de la armadura convencional de estribos, resulta de interés en VGA, en las que suelen existir grandes congestionamientos de armaduras.

En este trabajo se presentan los resultados de una campaña experimental en la que se evaluó la contribución en resistencia y ductilidad de las fibras de acero e híbridas en el comportamiento a corte de VGA. Para ello, se ensayaron a flexión, VGA de H⁹ A⁹ con barras y estribos tradicionales de acero, y vigas de hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) y de hormigón reforzado con fibras híbridas (HRFH) con una reducción del 33% del refuerzo de estribos verticales y sin estribos horizontales. Se observó que las VGA de hormigón con fibras alcanzaron cargas máximas de entre un 4 % y un 8% mayores a las de las vigas con armadura mínima a corte y mostraron una mayor resistencia residual post pico de cargas. Los resultados se muestran a partir de tablas y gráficos. Finalmente, se emiten algunas conclusiones

Palabras clave: Hormigón Reforzado con fibras, Vigas de gran altura.



I. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material frágil, con una resistencia a la tracción considerablemente menor que a compresión. El uso de fibras como agregado a la masa de hormigón es una alternativa útil y económica al refuerzo tradicional de barras de acero. Numerosas investigaciones demuestran que su uso aumenta la tenacidad y la capacidad del hormigón a resistir esfuerzos de tracción y corte Lantsoght E. 2019^[1], Cuenca E. 2015^[2], Heek et al. 2017^[3], Singh et al. 2014^[4], ACI 544 1.R^[5], Katzer J. 2006^[6]. El uso de macrofibras de polipropileno en particular ha sido investigado por autores como Kotecha P. 2019^[7] y Ortiz F. 2018^[8], demostrando que al igual que las de acero, logran reemplazar en alguna proporción la armadura tradicional de acero a corte. Para los casos en los que se combina la armadura tradicional con macrofibras de PP, se aumenta la carga máxima Ortiz F. 2018^[8].

El Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201-05^[9] y el Reglamento para Concreto Estructural ACI 318 S-14^[10] definen a las VGA, como aquellos elementos cargados en un borde y apoyados en el opuesto de tal manera que puedan generar bielas de compresión entre las cargas y los apoyos. La mayor parte de las cargas que soporta este tipo de vigas se transmite directamente a los apoyos debido a la pequeña proporción entre la luz de corte y la altura útil. En consecuencia, la falla generalmente es causada por corte es decir, son las tensiones de corte las que controlan la resistencia de una VGA Se ha demostrado que la capacidad resistente de las VGA aumenta con la resistencia del hormigón y con el incremento de la cuantía del refuerzo a corte (Aguilar et al. 2002^[12], Mohammad et al. 2012^[13], Choi et al. 2012^[14]). En las VGA suelen existir grandes congestionamientos de armaduras y dificultades constructivas. Surgen entonces, como alternativa constructiva, los hormigones reforzados con fibras, que según algunas investigaciones dan como resultado ahorros significativos de tiempo y mano de obra, buen control de calidad del material, y reducción o eliminación de la armadura mínima de corte (Canbolat et al. 2005^[15], Parra Montesinos, 2006 a^[16], Parra Montensinos et al., 2006 b^[17], Shahabi et al. 2007^[18], Tuchscherer y Quesada 2015^[19], Albidah et al. 2019^[20]). Otras investigaciones han demostrado también, la efectividad del uso de fibras de acero, polipropileno e híbridas como agregado al hormigón en VGA (Chittaranjan N. 2021^[21], Aref et al., 2020^[22], Suhail et al., 2017^[23], Moradi y Esfahani 2017^[23], Campione G. 2012^[24], Madan et al., 2007^[25], Smarzewski P. 2019^[26]).

El estudio del comportamiento mecánico de las VGA resulta de gran importancia debido a sus numerosas aplicaciones en distintas estructuras Por ello, resulta necesario contar con resultados de pruebas experimentales que reporten los beneficios que el uso de este material compuesto tiene en el comportamiento mecánico de las VGA y la posibilidad del reemplazo parcial o total de la armadura mínima de corte.

En este trabajo se muestran los resultados de una campaña experimental en la que se evalúa la efectividad del uso de fibras de acero e híbridas (de acero y macrofibras de polipropileno) como agregado al hormigón en VGA, en reemplazo parcial de la armadura tradicional de barras de acero. La efectividad del uso de dichas fibras se evaluó a partir del análisis de curvas carga – desplazamiento, resistencia residual post pico de carga y modos de falla.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Campaña Experimental

El programa experimental consistió en la elaboración y ensayo a flexión en tres puntos de 36 VGA elaboradas con 3 tipos de hormigón: simple, HRFA y HRFH. Dicho programa se desarrolló en 3 etapas de 12 VGA cada una. Todas las VGA de HRFA y HRFH se elaboraron con armadura de flexión y armadura de corte reducida. Además, se elaboraron y ensayaron probetas cilíndricas y vigas tipo RILEM para caracterizar el comportamiento mecánico del hormigón.

En la Tabla 1 se presenta la descripción de los especímenes ensayados, en cuanto a denominación, características geométricas y contenido de fibras en porcentajes de volumen. La nomenclatura utilizada es la siguiente: las letras AC, representan a los especímenes de hormigón simple con armadura a corte reglamentaria, mientras que las AR hacen referencia a las vigas de hormigón simple y armadura a corte reglamentaria reducida. Los especímenes de hormigón reforzado con fibras de acero son representados con la nomenclatura HRFA, en los que 0,5 y 1, representa el porcentaje de adición de fibras en volumen que es 0,5% y 1% respectivamente. Por su parte, las letras HRFH representan los especímenes de hormigón reforzado con fibras híbridas.

Campaña	Especimen	Fibras		Armadura de corte	
		Acero %	Polipropileno %	Horizontal Cuantía %	Vertical Cuantía %
I	V-AC	-	-	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.56 (mínima reglamentaria)
	V-AR	-	-	-	0.37
	HRFA-0,5	0,5	-	-	0.37
	HRFA-1	1	-	-	0.37
II	V-AC	-	-	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.56 (mínima reglamentaria)
	V-AR	-	-	-	0.37
	HRFA-0,5	0,5	-	-	0.37
	HRFH	0,5	0,5	-	0.37
III	V-AC	-	-	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.56 (mínima reglamentaria)
	V-SA	-	-	-	0.37
	HRFA-0,5	0,5	-	-	0.37
	HRFH	0,5	0,5	-	0.37

Características de los especímenes ensayados.

El diseño de las VGA se realizó siguiendo los lineamientos del Cirsoc 201-05[9] *Ápndice A*. Cada espécimen tiene una longitud de 600 mm con una luz entre apoyos de 500 mm y una sección de 300 mm de alto y 100 mm de ancho. La luz de corte es de 250 mm y la relación entre la luz libre y la altura es de 1.67 (los reglamentos CIRSOC y ACI, establecen que dicha relación sea menor que 4, para considerar una viga como de gran altura).

En todos los especímenes se colocó armadura de flexión. En las vigas de la serie “V-AC” se colocó armadura de corte reglamentaria, Cirsoc 201-05[9]. En el resto de los especímenes se colocó armadura de corte reducida y solo en la dirección perpendicular a la luz del tramo. En la Figura 2 se muestran detalles constructivos de un espécimen con armadura de flexión y corte completa y en la Figura 3 otro con armadura de corte reducida: sin esfuerzo horizontal a corte y con 4 estribos verticales en lugar de 6.

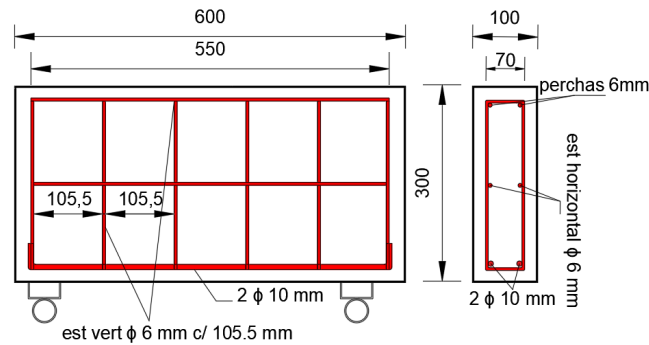


Figura 2. Dimensiones geométricas y detalle de armado de especímenes con armadura a corte mínima.

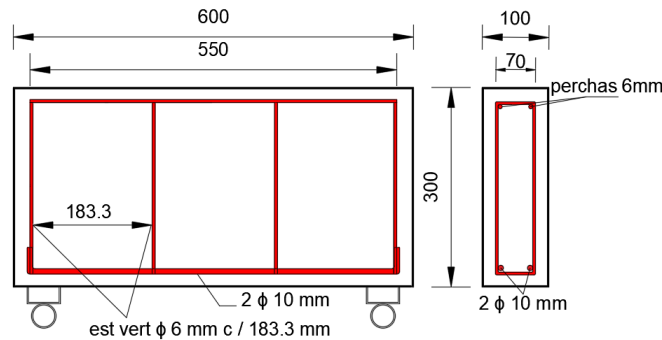


Figura 3. Dimensiones geométricas y detalle de armado de especímenes con armadura a corte reducida.

A. Materiales

Hormigón

En la ejecución de las vigas se utilizaron 3 tipos de hormigón: simple, HRFA y HRFH, dosificados según el Método ICPA de Diseño Racional de Mezclas de Hormigón del Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) en función de obtener una resistencia característica de rotura a compresión a los 28 días de 25 Mpa.

Acero

Para la armadura principal y la constructiva de todas las vigas se empleó acero de dureza natural Acindar denominado comercialmente DN A-420.

Fibras

Las fibras de acero empleadas son de extremo en gancho del tipo AR65 de ferrocement®. Para la elaboración del HRFH se utilizaron además macrofibras de polipropileno MACRONITA®, son fibras sintéticas recortadas de materiales poliméricos.

Propiedades	Fibras de acero	Macrofibras de polipropileno
Longitud (mm)	50	50
Diámetro (mm)	0.8	0.6
Módulo elástico (Gpa)	210	6
Relación de aspecto	62	83

Tabla 4 – Características de las fibras empleadas.



Figura 4. Imagen de las fibras empleadas.

B. Procedimiento de ensayo e instrumentación.

Con el objetivo de conocer el comportamiento mecánico de las VGA, se las sometió al ensayo de flexión en 3 puntos, bajo la condición de simplemente apoyadas. Estas pruebas implicaron la aplicación de cargas cuasi estáticas monótonas crecientes en el centro de la luz de las vigas. Las mismas fueron aplicadas usando una prensa Shimadzu con sistema hidráulico con capacidad de desarrollar una carga vertical nominal máxima de 1000 kN. Los valores de los desplazamientos se tomaron de manera continua con un equipo HBM QuantumX® MX840B conectado a una computadora con el software CatmanEasy®.

En las Figuras 5 a y 5b se muestra el esquema de ensayo e instrumentación utilizados. La Figura 5ª ilustra el esquema completo de ensayo e instrumentación, con detalles de las dimensiones y la Figura 5b incluye detalles del sistema de medición de cargas y desplazamientos.

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos experimentalmente. Se analizan cargas correspondientes a la primera fisura, cargas máximas, modos de falla y curvas carga-desplazamiento.

En la Tabla 5 se presentan los valores promedio de carga correspondiente a primera fisura, carga máxima (Pmax), desplazamiento vertical correspondiente a dicha carga y los modos de falla. Además, se muestra el porcentaje de incremento de las cargas máxima y primera fisura de las vigas de hormigón reforzado con fibras. Dicho porcentaje de incremento se calculó haciendo el cociente de la diferencia entre las cargas de la carga de los especímenes de hormigón con fibras y las de los sin fibras, sobre la carga los especímenes de hormigón simple con armadura de corte reducida.

Campaña	Especimen	Pcr (kN)	% incremento	Pmax (kN)	% incremento	δ_{max} (mm)	Modo de falla
I	V-SA	92	-	120	-	1,04	corte
	V-CA	94	-	140	-	0,98	corte
	V-HRFA	121.6	29,43	151.28	26,07	1,02	corte
	HRFA-1	120	27,65	167.07	39,22	1,18	corte
II	V-SA	94	-	147.54	-	0,77	Aplastamiento apoyos
	V-CA	100	-	164.41	-	0,9	corte
	HRFA	100	6,38	158.70	7,56	0,94	corte
	HRFH	105	11,7	170.25	15,39	0,97	corte
III	V-SA	95	-	143.54	-	0,92	corte
	V-CA	95	-	183.69	-	2,03	corte
	HRFA	105	10,52	190.55	32,74	2,31	corte
	HRFH	115	21,05	198.15	38,039	3,1	Corte y flexión

Tabla 5 – Resultados de ensayo a flexión de VGA.

C. Modos de falla

En la primera campaña todas las vigas fallaron por corte o compresión de la diagonal comprimida (Figuras 6^a y 6b). En cuanto a la segunda campaña, todos los especímenes fallaron por corte a excepción de dos especímenes de HS que fallaron por aplastamiento del hormigón en los apoyos y punto de carga y fisuración vertical (Figuras 7^a y 7b). Por su parte, en la tercera campaña todas las vigas fallaron por corte (Figuras 8^a, 8b, 8c y 8d). En los especímenes de HRFH se pudo observar una falla combinada de corte y flexión, lo que demuestra la efectividad del uso de fibras como refuerzo a la resistencia a corte de las VGA. Es decir, el uso de fibras no sólo resultó en un incremento de la capacidad de carga, sino también en una mejora del comportamiento a la falla que cambia de frágil a semi dúctil, que es una de las características más importantes del diseño por capacidad.

En general, se observó que las vigas de HRF mostraron patrones de fisuración mas extensos en el espacio, con mayor cantidad de fisuras y de menor apertura que las de las vigas de HS con armadura reducida, que mostraron fisuras localizadas y de mayor tamaño. Todos los especímenes conservaron el monolitismo luego de la falla.

En cuanto a los modos de falla de las fibras, se observó que las de acero fallaron por arrancamiento mientras que las de polipropileno fallaron por rotura.

D. Curvas carga-desplazamiento

En las Figuras 9, 10 y 11 se reproducen las curvas carga – desplazamiento de las vigas de HS con armadura de corte mínima y con armadura de corte mínima reducida, HRFA con 0.5% y 1% de adición de fibras y de HRFH, correspondientes a las tres campañas.

En la primera campaña, y según se puede ver en la figura 9 las vigas de HS con armadura a corte mínima mostraron una rigidez y capacidad de deformación similares entre sí. Los especímenes de HRFA con 0.5% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedio un 8% mayor a las vigas de HS con armadura a corte mínima. Por su parte, los especímenes de HRFA con 1% de adición de fibras, desarrollaron cargas máximas promedio un 19.34% mayor a las vigas de HS con armadura a corte

mínima. Se puede ver el efecto beneficioso de las fibras que retardan la aparición de dicha fisura y permiten alcanzar una mayor carga máxima que se incrementa con el aumento del volumen de fibras. También se puede ver que las vigas de HRFA mostraron mayor rigidez que las de HS con armadura de corte reglamentaria y con armadura de corte reducida.

La capacidad de deformación y la rigidez de las VGA de HRFA fue mayor a la de las vigas de HS.

En la segunda campaña, la rigidez del espécimen de HS y armadura a corte reducida fue menor que la de la viga con armadura mínima a corte, la capacidad de deformación de ambos tipos de viga fue similar. Los especímenes de HRFA con 0.5% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedio un 4% menores a las vigas de HS con armadura a corte mínima. Por su parte, los especímenes de HRFH desarrollaron cargas máximas promedio un 3% mayor a las vigas de HS con armadura a corte mínima. Las vigas de HRF no mostraron un aumento tan significativo en la resistencia con respecto a las de HS debido a que la resistencia a compresión del HRF resultó menor a la del HS, por tratarse de diferentes pastones dentro de la misma campaña. Esto concuerda con Smarzewsky2019 que encontró que la resistencia a la compresión del hormigón tiene una influencia decisiva en el pico de carga de las VGA. En cuanto a las cargas correspondientes a la primera fisura, se puede ver en la Figura 10, que la hibridización de acero y fibras sintéticas, viga V-HRFH muestra un efecto mejorado, en comparación con la viga V-HRFA, con un solo tipo de fibra y una mayor ductilidad.

La rigidez de la viga V-HRFH resultó similar a la V-CA y ligeramente mayor a la V-HRFA y la V-SA.

En la tercera campaña (Figura 11), la rigidez del espécimen de HS y armadura a corte reducida fue menor que la de la viga con armadura mínima a corte, al igual que la ductilidad. Los especímenes de HRFA con 0.5% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedio un 3,7% mayores a las vigas de HS con armadura a corte mínima. Por su parte, los especímenes de HRFH desarrollaron cargas máximas promedio un 8% mayor a las vigas de HS con armadura a corte mínima. La capacidad de deformación de las VGA de HRFA fue superior a la de las vigas de HS, mostrando una mayor rigidez inicial. Por su parte, las vigas de HRFH tuvieron una capacidad de deformación sensiblemente superior a las vigas de HS e incluso a las de HRFA, con una rigidez inicial superior a las de HS. En este caso la hibridización con fibras de acero y fibras sintéticas resultó en una mayor capacidad resistente y de deformación que las alcanzadas por las vigas con armadura de corte reglamentaria y armadura de corte reducida, y también ligeramente superior a la resistencia del espécimen reforzado con un solo tipo de fibra y armadura de corte reducida.

Si bien es necesario realizar un mayor número de ensayos, se puede vislumbrar que el reemplazo parcial de la armadura de corte mínima, por fibras híbridas, puede proveer resistencias últimas y capacidad de deformación, similares.

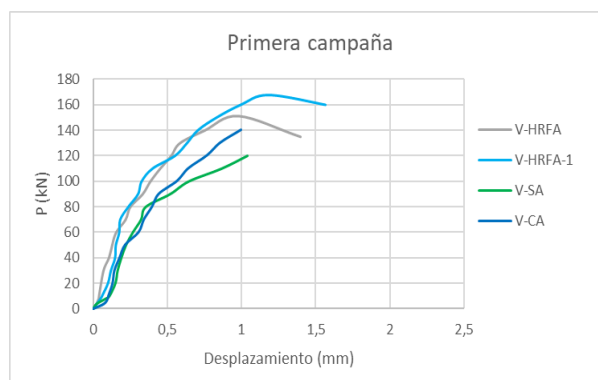


Figura 9. Curvas carga – desplazamiento primera campaña.

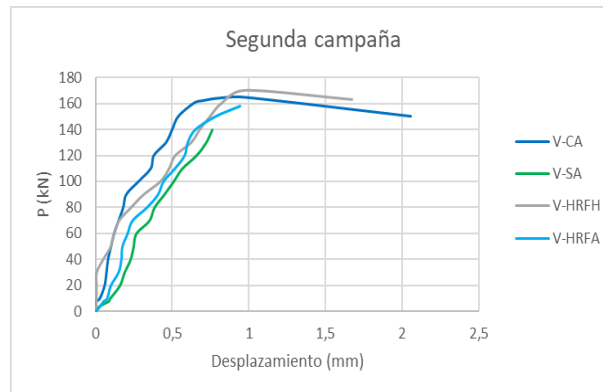


Figura 10. Curvas carga – desplazamiento segunda campaña.

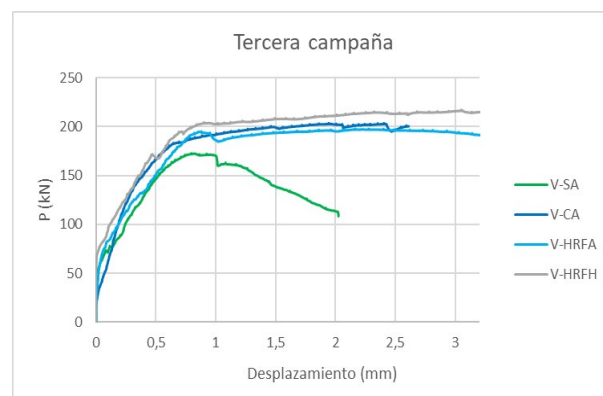


Figura 11. Curvas carga – desplazamiento tercer campaña.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se present un estudio experimental de la capacidad resistente a corte de VGA de HS, HRFA y HRFH, sometidas al ensayo de flexión con carga monotónica. Del análisis y comparación de los resultados, se puede decir que:

La incorporación de fibras de acero mejoró el comportamiento en resistencia de las vigas con armadura a corte reducida. Al aumentar el volumen de fibras agregado al hormigón, se logró un incremento significativo de la capacidad resistente, en detrimento de la trabajabilidad de la mezcla.

En general se observó, que la adición de un solo tipo de fibras, y más aún, el agregado de dos tipos diferentes, fibras de acero y fibras de polipropileno, permitió obtener cargas correspondientes a la primera fisura, mayores que las obtenidas en el caso de los especímenes con armadura de corte mínima, y armadura de corte reducida.

Algunos de los especímenes de hormigón reforzado con fibras mostraron modos de falla combinado a corte y flexión lo que demuestra la eficiencia del uso de las fibras como refuerzo al corte.

Los especímenes de HRFH mostraron en general, mayor resistencia y capacidad de deformación que los de HS y HRFA.

La resistencia a la compresión del hormigón tiene una fuerte influencia en la carga máxima de las VGA.



V. REFERENCIAS

- [1] Lantsoght Eva O. L., 2019. *How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups?* Composites Part B, vol. 175.
- [2] Cuenca E., 2015. *On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforced Concret.* Universitat Politècnica de València, España.
- [3] Heek P. y Mark P, 2017. *Numerical Simulation of Steel Fibre Reinforced Concrete Girders Subjected to Cyclic Loads.* High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet pp. 356.365.
- [4] Harvinder Singh, 2014. *Steel Reinforced Concrete.* Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering
- [5] ACI 544.1R, 1996-2002. Report on fiber reinforced concrete.
- [6] Katzer J., 2006. *Steel fibers and steel fiber reinforced concrete in civil engineering.* The Pacific Journal of Science and Technology
- [7] Kotecha P y Abolmaali A., 2019. *Macro synthetic fibers as reinforcement for deep beams with discontinuityregions: Experimental investigation.* Engineering Structures
- [8] Ortiz Navas F., Leiva Herdocia G, Serna P y Cuenca E., 2018. *An experimental study on the shear behaviour of reinforced concretebeams with macro-synthetic fibres.* Construction and Building Materials, vol. 169.
- [9] CIRSOC 201-2005. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.
- [10] ACI, 2014. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. American Concrete Institute.
- [11] EUROCODIGO BS EN1992-1-1.
- [12] Aguilar G, Matamoros A. B., Parra-Montesinos G. and Wight James K., 2002. Experimental Evaluation of Design Procedures for Shear Strength of Deep Reinforced Concrete Beams. ACI Structural Journal pp 539-548.
- [13] Mohammad Mohammadhassani, Hossein Nezamabadi-Pour, MohdZamin Jumaat, Mohammed Jameel1b, S.J.S.Hakim and Majid Zargar, 2012. *Application of the ANFIS model in deflection prediction of concrete deep beam.* Structural Engineering and Mechanics, vol. 45, pp. 319-332.
- [14] Choi Y., Lee H., Chu S., Cheong S and Jung W., 2012. Shear Behavior and Performance of Deep Beams Made with Self-Compacting Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials.
- [15] Canbolat, B. A., Parra-Montesinos, G. J., Wight, J. K., 2005, Experimental Study on Seismic Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cement Composite Coupling Beams, ACI Structural Journal, 102(1), 159-166.
- [16] Parra-Montesinos, G. 2006 a), "Shear Strength of Beams with Deformed Steel Fibers, Evaluating an alternative to minimum transverse reinforcement". Concrete International, pp. 58-65.
- [17] Parra-Montesinos, G., Wight, J.K., Dinh, H., Libbrecht, A., and Padilla, C., 2006 b), "Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete Beams Without Stirrups," Report No. UMCEE 06-04, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 39 pp.



- [18] Shahabi, S.; Hassan, Z.M.; Mahdavi, M.; Dezfouli, M.; Rahvar, M.T.; Naseri, M.; Jazani, N.H., 2007. Steel fibers as replacement of web reinforcement for rcc deep beams in shear. *Asian J. Civ. Eng. Build. Hous*, 8, pp. 479–489.
- [19] Tuchscherer Robin G. and Quesada Alejandra, 2015. Replacement of Deformed Side-Face Steel Reinforcement in Deep Beams With Steel Fibers. *Structures*, vol. 3 pp. 130-136.
- [20] Aref A. Abadel y Abdulrahman S. Albidah, 2019. *Investigation of Shear Reinforcement Schemes for RC Deep Beams*. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- [21] Chittaranjan B. Nayak, 2021. *Experimental and numerical study on reinforced concrete deep beam in shear with crimped steel fiber*. *Innovative Infrastructure Solutions* vol 7:41.
- [22] Suhail Shaikh, S. K. Kulkarni, S. S. Patil y S. A. Halkude, 2017. *Effect Of Hybrid Fibre Reinforcement In Concrete Deep Beams*. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, vol. 3.
- [23] Moradi, M. y Reza Esfahani, M., 2017. *Application of the strut-and-tie method for steel fiber reinforced concrete deep beams*. *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 423-437.
- [24] Campione G., 2012. *Flexural Behavior of Steel Fibrous Reinforced Concrete Deep Beams*. *Journal of structural engineering*, pp. 235-246.
- [25] S. K. Madan, G. Rajesh Kumar y S. P. Singh, 2007. *Steel fibers as replacement of web reinforcement for rcc deep beams in shear*. *Asian Journal of civil engineering (building and housing)*, vol 8.
- [26] Smarzewski P, 2019. *Analysis of Failure Mechanics in Hybrid Fibre-Reinforced High-Performance Concrete Deep Beams with and without Openings*. *Materials* vol 12, 101.



Modelos Numéricos en GPGPU para el Tratamiento de Fondos Móviles Erosionables

Doctorando: Lucas C. Bessone Martínez

*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia, Argentina
(lcbessone@gmail.com)*

Director: Mario Storti

*Centro de Investigación de Métodos Computacionales, Predio CONICET, Santa Fe,
Argentina (mario.storti@gmail.com)*

Codirector: Pablo Gamazo

*Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República, Uruguay
(gamazo@unorte.edu.uy)*

Resumen: El transporte de sedimentos y su impacto en la morfología de los cauces es de mucho interés en problemas de ingeniería y ciencias ambientales. La simulación numérica de los procesos sedimentarios permite una mejor comprensión de los fenómenos involucrados, resultando en una herramienta que permite reducir en gran medida, los tiempos y costos asociados a la implementación de modelos y experimentos físicos. Los principales ingredientes para una simulación numérica exitosa son: tener resolvers eficientes, robustos y que puedan ajustarse a los distintos tipos de escenarios, y por otro lado, que logren reproducir correctamente la física del mecanismo de transporte de sedimentos y los cambios morfológicos que originan.

La dinámica fluvial es compleja y muchas veces involucra modelos de flujo tridimensionales, esto implica disponer de recursos computacionales considerables (en general un clúster de computadoras) a la vez que las simulaciones requieren varios días de uso intensivo de cómputo según la cantidad procesadores disponibles. En este trabajo se muestra como el uso de placas de video puede ser una herramienta muy útil para reducir la cantidad de equipo informático y los tiempos de cómputo que se necesitan para llevar a cabo este tipo de simulaciones numéricas.

Palabras clave: GPGPU, Flujos Incompresibles, Volúmenes Finitos, Navier Stokes.

I. INTRODUCCIÓN

El flujo alrededor de estructuras hidráulicas se caracteriza por su geometría compleja y arbitraria, debido a la morfología del lecho, la forma de las obras y las estructuras de vórtices que se forman. Estos vórtices interactúan con los sedimentos del lecho y esto conduce a la socavación local, que en algunos casos, pone en peligro la estabilidad del cauce quitándole fiabilidad al empotramiento de las estructuras. La socavación es uno de los principales modos de falla de las pilas de puentes.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Comenzando con la ecuación general de transporte, se implementó un resolvidor basado completamente en GPU del tipo temporal explícito y otro implícito, usando el Método de los Volúmenes Finitos (FVM) en grillas cartesianas uniformes, guardando las variables en forma colocada. Para el término difusivo se utilizan diferencias centradas, mientras que para el término advectivo se dispone tanto de esquemas de bajo orden (upwind) como de alto orden (HO) y de alta resolución (HR), por ejemplo QUICK, MINMOD, MUSCL entre otros.

Para resolver las ecuaciones del flujo incompresible se implementó el método de Pasos Fraccionados (FS) combinado con el Método de Fronteras Embebidas (IBM) utilizando celdas fantasmas (GC).

La superficie del lecho y los obstáculos sólidos se representan mediante técnicas del tipo Level Set (LS). Finalmente para predecir el transporte de sedimentos se utilizaron modelos estándar de transporte sólido mediante carga de fondo.

A. Ecuaciones

Para el flujo incompresible se resuelven mediante FVM, las ecuaciones de Navier Stokes:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{R_e} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

Una vez obtenido el campo de velocidades, se calcula el esfuerzo de corte en el lecho ajustando una ley de pared al perfil de velocidades obtenido. Con los esfuerzos de corte y un modelo estándar de carga de fondo, como por ejemplo el modelo de Meyer-Peter-Muller ([Meyer-Peter y Muller, 1948](#), [Wong y Parker, 2006](#)) se calculan las descargas de sedimento en el fondo:

$$\frac{q_b}{\sqrt{\Delta_g D^3}} = \begin{cases} 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} & \text{si } \tau^* \geq \tau_c^* \\ 0 & \text{si } \tau^* < \tau_c^* \end{cases} \quad (3)$$

Con las descargas de sedimento en el fondo, se resuelve la ecuación de Exner ([Exner, 1925](#)) para determinar la evolución temporal del nivel del lecho de fondo:

$$(1 - n) \frac{\partial \xi}{\partial t} = - \frac{\partial q_{bi}(\tau_{(u_i)})}{\partial x_i} \quad (4)$$

El conjunto de ecuaciones se resuelve usando una estrategia de acople particionado, es decir en cada paso temporal, se resuelve primero el campo de velocidades para un dominio espacial fijo, se determinan los esfuerzos de corte, se evalúan las descargas de sedimento, luego se resuelve la ecuación de Exner y finalmente se actualiza el dominio físico para avanzar al siguiente paso

de tiempo. A su vez, al modelo de flujo incompresible se incorporan modelos de turbulencia del tipo LES explícito o el modelo tipo RANS $k - \omega SST$.

B. Detalles de la implementación

Los algoritmos implementados se ejecutaron en un equipo Dell PowerEdge R740 con procesador Intel Xeon Gold CPU 6138 con 128GB DDR4 RAM provisto de una tarjeta de video NVIDIA Tesla V100 GPU con 32GB de memoria HBM2. El sistema operativo es CentOS Linux v7, el compilador GCC 4.8.5 y la versión 9.1 para el compilador nvcc de CUDA. Todas las implementaciones se realizaron de doble precisión (DP) en un código propio basado completamente en GPU. Todas las operaciones de álgebra lineal fueron implementadas con ayuda de la librería CUBLAS.

III. RESULTADOS

En la Figura 1 se presentan a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el flujo alrededor de una pila circular en régimen turbulento, en las mismas, pueden apreciarse los campos de energía cinética y la tasa de disipación turbulentas. En la Figura 2 se muestran los remolinos mediante dos técnicas de visualización de estructuras de vórtices.

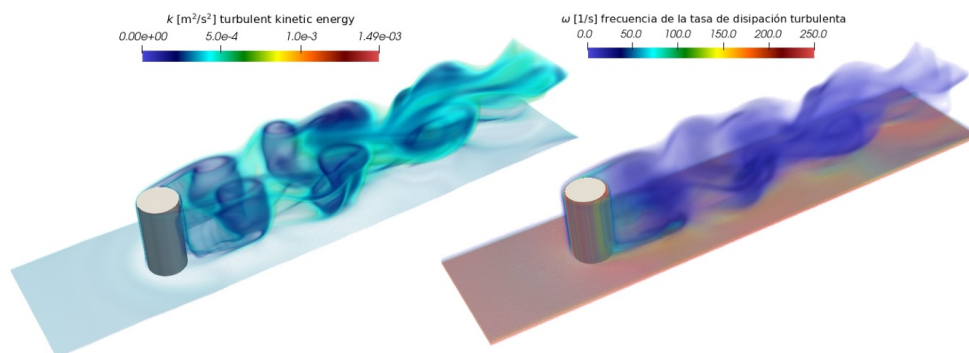


Fig. 2: Visualización de los dos escalares transportados en el modelo $k-\omega SST$ en un instante de simulación. Energía cinética k (izquierda) y razón de disipación turbulenta ω (derecha).

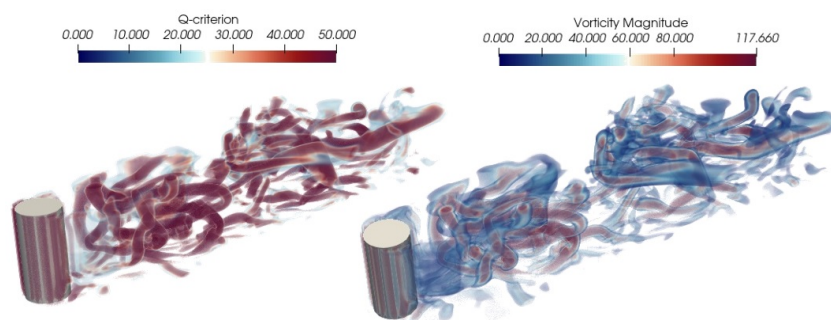


Fig. 2: Visualización de las estructuras de vórtices utilizando el Criterio Q y módulo del campo de vorticidad.

Se validó el código para el caso de erosión alrededor de un obstáculo rectangular a $Re=1000$. En la Figura 3 puede observarse que se logra obtener con buena aproximación el patrón de erosión - sedimentación alrededor del obstáculo, obtenidas en un experimento físico (Burkow, 2010).

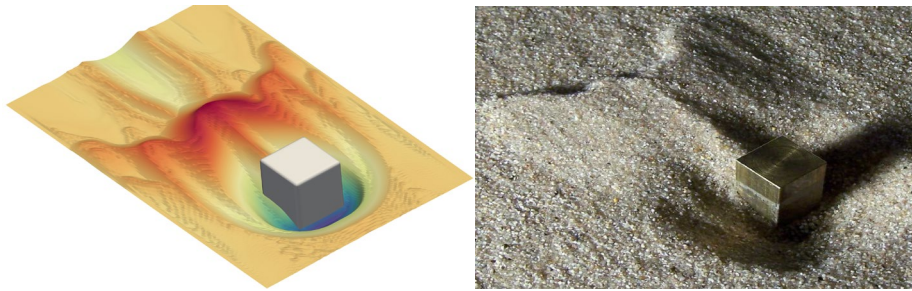


Fig. 3: Comparación de la erosión alrededor de un obstáculo rectangular a $Re=1000$, luego de 500 segundos. Resultados de este trabajo (izquierda), resultados experimento físico (Burkow, 2010).

En la Figura 4 se puede apreciar cualitativamente las complejas estructuras de vórtices teóricas que se espera obtener para este caso.

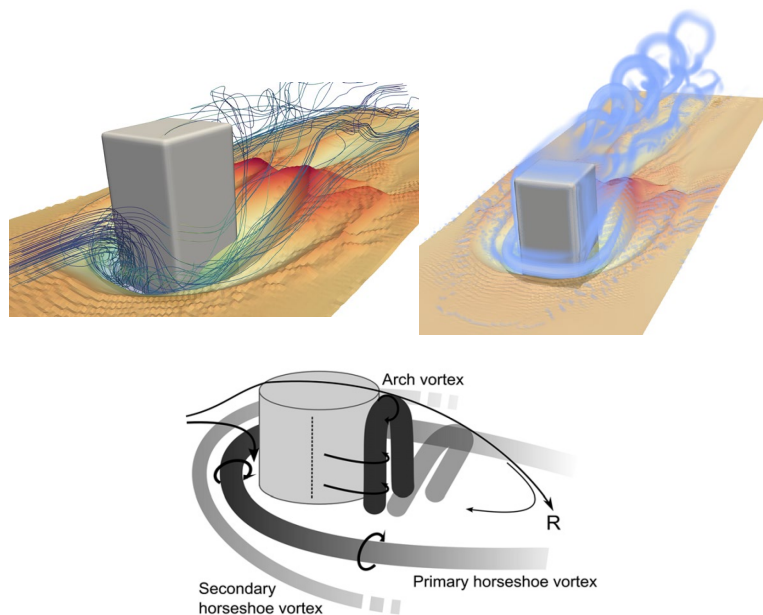


Fig. 4: Líneas de corriente alrededor del obstáculo (arriba-izquierda) Captura de los vórtices de herradura obtenidos en la simulación numérica de este trabajo (arriba-derecha). Patrones de flujo idealizados, figura extraída de Euler y Herget (2012) (abajo-centro).

Finalmente en la Figura 5 se compara la profundidad de erosión delante del objeto (curva azul) cuyos valores resultan más importantes para aplicaciones de ingeniería fluvial. Puede observarse que los resultados concuerdan con las simulaciones de Burkow, et al (2016). Por otra parte, la altura de sedimentación (curva roja) difiere levemente, respecto a esto, hay que tener en cuenta que ambas simulaciones comparadas, se realizaron don diferentes condiciones de contorno, diferentes metodologías y algoritmos con lo que el resultado obtenido se considera suficientemente aceptable.

Los tiempos de cómputo para la simulación de erosión durante 500s físicos, fue del orden de 10h, utilizando una sola tarjeta de video, mientras que el tiempo reportado en Burkow (2016), utilizando el software NaSt3D paralelizado en CPU, fue de 180h de cómputo, utilizando 2 nodos de un clúster con un total de 64 núcleos. Esto muestra que se requieren cerca de 36 nodos de similares características, para igualar el tiempo de cómputo de una tarjeta.

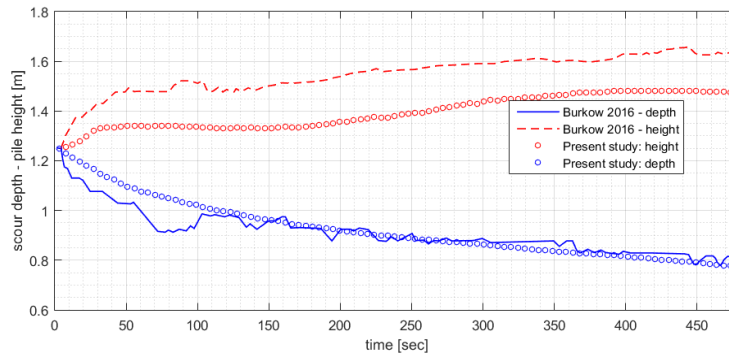


Fig. 5: Validación de resultados: evolución de la profundidad de socavación delante del obstáculo y la altura máxima de la duna depositada tras el obstáculo.

IV. CONCLUSIONES

Se implementaron algoritmos eficientes en GPU de acuerdo a las características específicas del hardware, para resolver el flujo y el transporte de sedimentos, que permiten predecir la socavación local alrededor de obstáculos inmersos en una corriente líquida. Los resultados obtenidos fueron validados con los trabajos de otros autores. Se muestra entonces que la GPU surge como una alternativa para la computación de alto desempeño, capaz de realizar simulaciones numéricas aplicadas a la hidráulica fluvial con tiempos de cómputo reducidos.

AGRADECIMIENTOS

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia ("Becas de formación de doctores para fortalecer las áreas de I+D+i", Res. 1460/15).

Departamento del Agua, Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República.

V. REFERENCIAS

Burkow, M. (2010). Numerische simulation stromungsbedingten sedimenttransports und der entstehenden gerinnebettformen. Master's thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, Germany.

Burkow, M., & Griebel, M. (2016). A full three dimensional numerical simulation of sediment transport and the scouring at a rectangular obstacle. *Computers & Fluids*, 125, 1-10.

Euler, T., & Herget, J. (2012). Controls on local scour and deposition induced by obstacles in fluvial environments. *Catena*, 91, 35-46.

Exner F. M. (1925). Über die wechselwirkung zwischen wasser und geschiebe in flüssen. *Sitzungsberichte. Abt. 2a Mathematik Astronomie Physik Und Meteorologie (Akademie Der Wissenschaften in Wien Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse)* 134. Bd. (jahr. 1925).

Meyer-Peter E. y Muller R. Formulas for bed-load transport. En *IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2*. IAHR, 1948.

Wong M. y Parker G. Reanalysis and correction of bed-load relation of meyer-peter and muller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11):1159-1168, 2006.



Programación automática inteligente de calentadores de agua para su eficiencia energética

Article title: Smart automatic scheduling of electric water heaters for energy efficiency

Bruno Bignotti

UTN Facultad Regional Concordia

Email: b.bignotti.utn@gmail.com

Resumen: Este trabajo presenta un algoritmo novedoso para la operación de aparatos que de forma inteligente, formulación la cual planteamos en este trabajo para la programación de los calentadores de agua eléctricos (termotanques eléctricos) basándose en pronósticos de consumo (en lugar de su programación normal la cual esta basada en un termostato) de manera tal de lograr un objetivo de optimización como ser pagar lo menos posible. Las ecuaciones dinámicas de la temperatura del termotanque eléctrico están modeladas dentro del problema de optimización. El consumo de agua caliente se mide usando un medidor de caudal conectado a un micro controlador, el cual esta conectado a la red local de wifi para poder subir los datos a la nube. En la nube, tales datos se usan para alimentar una red neuronal usando computación en la nube o un servidor local. La red neuronal va a llevar a cabo una tarea de aprendizaje supervisado usando información etiquetada de los datos de consumo de agua caliente para realizar una regresión. El modelo principal de red neuronal elegido es árbol de decisión, aunque la librería de machine learning utilizada implementa modelos adicionales para aumentar su robustez, conocidos como métodos de aprendizaje ensamblados, en este caso un árbol de decisiones de aumento de gradiente. Los mismos son similares a los bosques de decisión aleatoria (random decision forests) donde el resultado de muchos árboles de decisión es usado para obtener un resultado final. Las etiquetas o características de los datos son la fecha y hora en el momento que el consumo ocurrió. De esta manera el modelo puede aprender los patrones de consumo. Entonces se usa una suite de optimización online para ejecutar un algoritmo de programación lineal mezclada con enteros para resolver el problema de optimización de operación del aparato. Además, se implementa el confort del usuario como un conjunto de restricciones en el modelo de optimización. Los resultados de la simulación demuestran que la implementación es rápida, robusta y flexible. Esta tecnología puede ser usada en domicilios o en sistemas de administración de energía para ayudar a los propietarios o administradores a crear programas de operación óptima de carga basados en diferentes costos y opciones de confort y luego comparar los costos y beneficios entre los distintos programas

Palabras clave: Ahorro de energía, optimización, inteligencia artificial, automatización, computación en la nube

Abstract:



This work presents a novel appliance operation algorithm that smartly schedules usually thermostat-controlled household water heaters based on consumption forecasts and considering users' comfort settings to meet an optimization objective such as minimum payment. The formulation of the appliance optimal operation problem is described using a household electrical water heater. The thermal dynamics of heating of the water heater load is modeled by physical thermal models. Hot water consumption is measured using a flow rate meter connected to a microcontroller, which is connected to a local wifi network in order to upload the data to the cloud. At the cloud, data is used as an input for a neural network using a cloud computing service or a local server. The neural network will perform a supervised learning using the labeled data from hot water measurements to perform a regression. The main neural network model chosen is decision tree (DT), though the machine learning library used implements additional learning models to increase its robustness, known as ensemble learning methods, in this case a gradient boosted decision tree. Decision trees are a chain of boolean operations along the features of the data which ultimately decide the outcome. Gradient boosted decision trees are similar to random decision forests, where the result of many decision trees is used to obtain the final result. The features or labels of the data is the date and time where the consumption occurred. This way the model can learn the consumption patterns. Then, a web based optimization suite is utilized to run a Mixed Integer Linear Programming algorithm to solve the appliance optimal operation problem. Also, user comfort is implemented as a set of linear constraints in the optimization model. The simulation results demonstrate that the implementation is fast, robust, and flexible. The technology can be used in home/building energy-management systems to help household owners or building managers to automatically create optimal load operation schedules based on different cost and comfort settings and compare cost/benefits among schedules.

Keywords: Energy saving, optimization, Artificial intelligence, automation, cloud computing









Índice

ESTUDIO DE CRECIMIENTO DE ÁRBOLES DE MANDARINO NADORCOTT EN ENTRE RÍOS	1
I. INTRODUCCIÓN	2
A. LA VARIEDAD NADORCOTT	2
B. PLANIFICACIÓN DE LA PLANTACIÓN	2
C. MANEJO DEL TAMAÑO DE LOS ÁRBOLES	3
INFLUENCIA DEL PORTAINJERTO SOBRE LA VARIEDAD	3
DENSIDAD DE PLANTACIÓN	4
INFLUENCIA DEL HLB EN EL DISEÑO DE PLANTACIONES	5
II. MATERIALES Y MÉTODOS	6
III. RESULTADOS	7
D. RELACIÓN VOLUMEN DE COPA CON LA RELACIÓN DIÁMETRO DE TRONCO/DIÁMETRO DEL PORTAINJERTO	8
E. ANÁLISIS DE DATOS PRODUCTIVOS	10
IV. DISCUSIÓN	12
V. CONCLUSIONES	13
VI. AGRADECIMIENTOS	15
VII. REFERENCIAS	15
MODELO DE DISTRIBUCIÓN RESISTIVO DEL SUBSUELO Y SUS APLICACIONES EN INGENIERÍA GEOLÓGICA, CUENCA DEL ARROYO PALMAR, ENTRE RÍOS.	20
I. INTRODUCCIÓN	21
II. MATERIALES Y MÉTODOS	21
A. ÁREA DE ESTUDIO REGIONAL	21
B. ZONA DE ESTUDIO EN DETALLE (ZED)	22
C. ESTUDIO DE CAMPO EXPLORATORIO	23
D. ENSAYOS DE LABORATORIO	24
E. ESTUDIO DE CAMPO PARAMÉTRICO	25
F. MAPAS GEOELÉCTRICOS	26
G. LEVANTAMIENTO MAPA GEOMECÁNICO	26
H. VALIDACIÓN DE LOS MAPAS GEOMECÁNICOS	27
III. RESULTADOS	27
IV. CONCLUSIONES	35
V. REFERENCIAS	36
ENSAYOS SOBRE PASTAS Y MORTEROS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN LIVIANO AUTOCOMPACTADO DE ALTA RESISTENCIA REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO.	37
I. INTRODUCCIÓN	38
II. MATERIALES Y MÉTODOS	38
A. ENSAYOS SOBRE PASTAS Y MORTEROS	38
B. MATERIALES Y MEZCLAS	40
III. RESULTADOS	40



C.	RELACIÓN MÍNIMA V_A/V_{MC} PARA FLUJO CERO	40
D.	COMPATIBILIDAD CEMENTO-ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE	41
E.	RESULTADOS DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS	42
IV.	CONCLUSIONES	42
V.	REFERENCIAS	43

MODELO NUMÉRICO PARA EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS HÍBRIDAS: APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO. **45**

I.	INTRODUCCIÓN	46
II.	MATERIALES Y MÉTODOS	47
	CAMPAÑA EXPERIMENTAL	47
	CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES ENSAYADOS.	47
A.	MATERIALES	48
	HORMIGÓN	48
	ACERO	48
	FIBRAS	48
B.	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO E INSTRUMENTACIÓN.	49
III.	RESULTADOS	49
C.	MODOS DE FALLA	50
D.	CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO	50
IV.	CONCLUSIONES	52
V.	REFERENCIAS	53

MODELOS NUMÉRICOS EN GPGPU PARA EL TRATAMIENTO DE FONDOS MÓVILES EROSIONABLES **55**

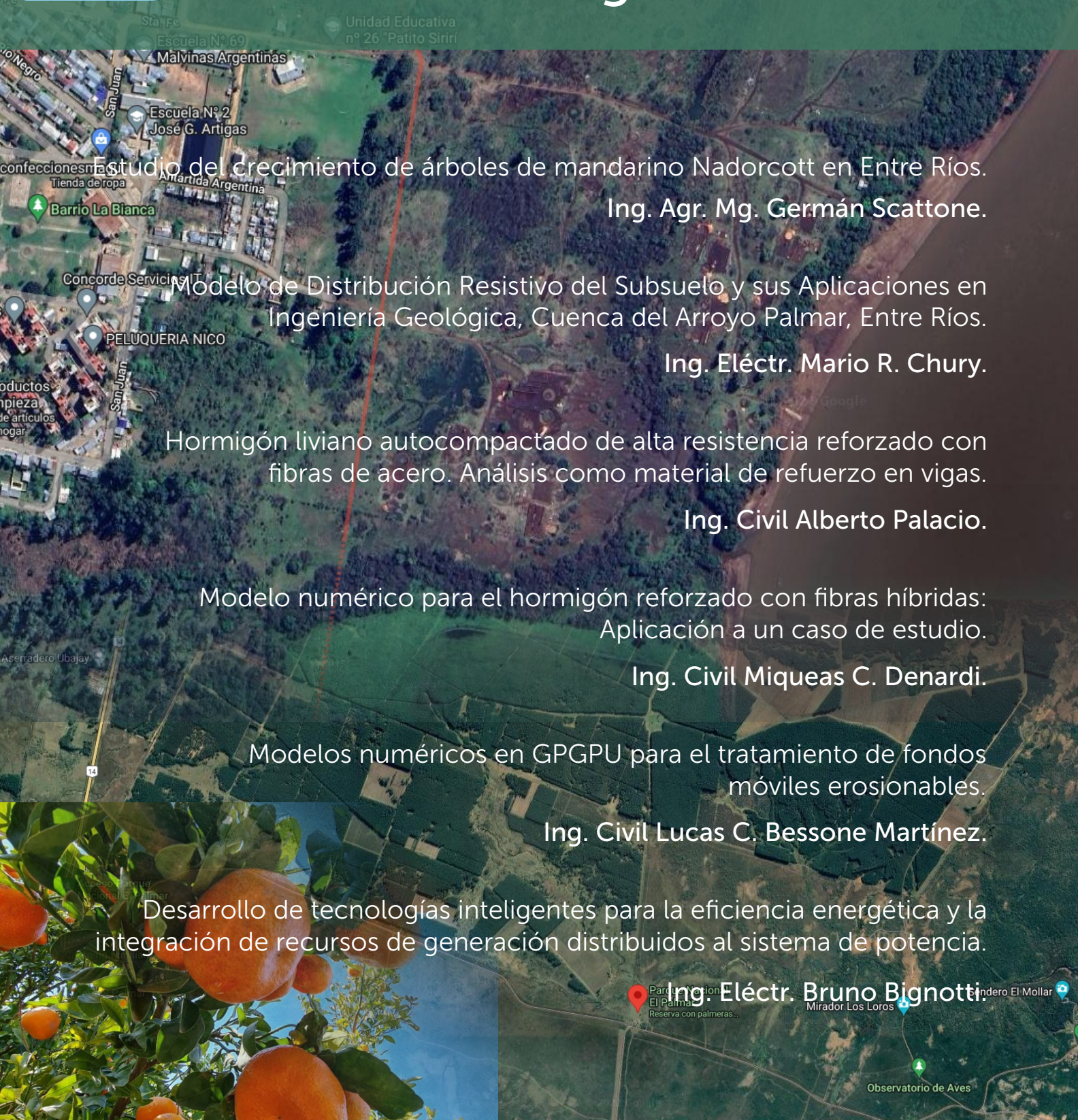
I.	INTRODUCCIÓN	56
II.	MATERIALES Y MÉTODOS	56
A.	ECUACIONES	56
B.	DETALLES DE LA IMPLEMENTACIÓN	57
III.	RESULTADOS	57
IV.	CONCLUSIONES	59
V.	REFERENCIAS	59

PROGRAMACIÓN AUTOMÁTICA INTELIGENTE DE CALENTADORES DE AGUA PARA SU EFICIENCIA ENERGÉTICA **60**

ÍNDICE	65
---------------	-----------



Actas de las segundas Jornadas de doctorandos de la Facultad Regional Concordia



Estudio del crecimiento de árboles de mandarina Nadorcott en Entre Ríos.
Ing. Agr. Mg. Germán Scattone.

Modelo de Distribución Resistivo del Subsuelo y sus Aplicaciones en
Ingeniería Geológica, Cuenca del Arroyo Palmar, Entre Ríos.
Ing. Eléctr. Mario R. Chury.

Hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con
fibras de acero. Análisis como material de refuerzo en vigas.
Ing. Civil Alberto Palacio.

Modelo numérico para el hormigón reforzado con fibras híbridas:
Aplicación a un caso de estudio.
Ing. Civil Miqueas C. Denardi.

Modelos numéricos en GPGPU para el tratamiento de fondos
móviles erosionables.
Ing. Civil Lucas C. Bessone Martínez.

Desarrollo de tecnologías inteligentes para la eficiencia energética y la
integración de recursos de generación distribuidos al sistema de potencia.
Ing. Eléctr. Bruno Bignotti.

