

**PROPUESTA DE UN MODELO MACHINE LEARNING PARA PREDECIR LA
SEVERIDAD DE LA REABSORCIÓN RADICULAR INDUCIDA POR
ORTODONCIA**

PROPOSAL OF A MACHINE LEARNING MODEL TO PREDICT THE SEVERITY OF
ROOT RESORPTION INDUCED BY ORTHODONTICS

Daniel Esteban Arrubla Escobar, dearrublae@libertadores.edu.co, Fundación Universitaria Los
Libertadores

José John Fredy González Veloza, jjgonzalezv02@libertadores.edu.co, Fundación Universitaria
Los Libertadores

RESUMEN

Introducción: La reabsorción radicular (RR) puede ser considerada una consecuencia iatrogénica común del tratamiento de ortodoncia observada por los ortodoncistas durante el tratamiento y su diagnóstico es principalmente radiográfico. El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo que permita predecir la severidad de la RR que podría presentar un paciente considerando variables diagnósticas y del tratamiento. Esto le permitirá al ortodoncista prever la disposición del paciente a desarrollar RR al iniciar su tratamiento, con el fin de promover la toma de decisiones clínicas que permitan mantener la salud de los tejidos dentales. **Metodología:** Se toman 191 registros de un estudio realizado por Silva y cols. (2018), se realiza el respectivo etiquetado para la clasificación de la severidad de la reabsorción (OIEARRmax: Leve 0-15 %, moderada/severa > 15%). Se entrenaron y evaluaron un modelo base y cuatro modelos de aprendizaje supervisado. **Resultados:** se creó un modelo de análisis discriminante lineal que permite predecir la severidad de la RR con una

sensibilidad del 60.67% y una precisión del 74.88%. También se logran establecer como las variables más influyentes en el modelo el uso de aparatología funcional y Hyrax, edad, presencia de extracciones o mordida abierta y duración de tratamiento. El hábito de interposición lingual parece no tener un rol relevante en el desarrollo de la RR. **Conclusión:** se entrenaron y evaluaron diferentes modelos de aprendizaje automático supervisado, logrando buena sensibilidad y precisión con el modelo de análisis discriminante lineal (LDA), sin embargo, la elaboración de nuevos modelos de clasificación evaluando otras variables como antecedentes médicos y odontológicos personales, así como un mayor tamaño muestral para el entrenamiento del modelo, es requerida para buscar predicciones que sean aplicables con mayor seguridad en la práctica ortodóncica diaria.

Palabras clave: reabsorción radicular, ortodoncia, aprendizaje automático, severidad, predicción.

ABSTRACT

Introduction: Root resorption (RR) can be considered a common iatrogenic consequence of orthodontic treatment observed by orthodontists during treatment and its diagnosis is mainly radiographic. The aim of this study is to develop a model that allows predicting the severity of RR that a patient could present considering diagnostic and treatment variables. This will allow the orthodontist to anticipate the patient's willingness to develop RR at the beginning of their treatment, in order to promote clinical decision-making that allows maintaining the health of dental tissues. **Methods:** 191 records are taken from a study conducted by Silva et al. (2018), the respective labeling is carried out for the classification of the severity of the resorption (OIEARRmax: mild 0-15%, moderate/severe > 15%). A base model and four

supervised learning models were trained and evaluated. **Results:** a linear discriminant analysis model was created to predict the severity of RR with a recall of 60.67% and a precision of 74.88%. The most outstanding variables in the model were also established and included the use of functional appliances and Hyrax, age, presence of premolar extractions or open bite and duration of treatment. The tongue thrusting habit does not seem to play a relevant role in the development of RR. **Conclusion:** different supervised machine learning models were trained and evaluated, achieving good sensitivity and precision with the linear discriminant analysis (LDA) model; however, the development of new classification models evaluating other variables such as personal medical and dental history, as well as A larger sample size for model training is required to search for predictions that are applicable with greater certainty in daily orthodontic practice.

Keywords: root resorption, orthodontics, machine learning, severity, prediction.

INTRODUCCIÓN

La reabsorción radicular (RR) es un proceso patológico que se manifiesta con la reducción del grosor o la longitud de la raíz dental (Darendeliler y cols., 2004). Este tipo de situación clínica es observada por los ortodontistas durante el tratamiento y su diagnóstico es principalmente radiográfico (Vasconcelos Picanço y cols., 2013). A pesar de que la radiografía panorámica puede subestimar la magnitud del problema, esta es la ayuda diagnóstica más utilizada en consulta (Dudic y cols., 2009).

La literatura es muy controversial en relación con los factores que influyen la aparición y severidad de la reabsorción durante el tratamiento de ortodoncia dada la

complejidad de este fenómeno multifactorial (Darendeliler y cols., 2004; Levander y Malmgren, 1988; Vasconcelos Picanço y cols., 2013). Debido a esto, para el ortodoncista es complicado realizar una predicción certera de la posible aparición o no de un caso de RR y la severidad o impacto que esta tendrá sobre los tejidos dentales en un paciente que inicia su tratamiento, sin embargo, tener la capacidad de adelantarse a su gravedad, podría favorecer la toma de decisiones clínicas que permitan disminuir dicho riesgo mediante el control de factores modificables durante el tratamiento, así como incrementar el seguimiento radiográfico en los pacientes en los que sea necesario. El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo que permita predecir la severidad de la reabsorción radicular que puede presentar un paciente que inicie tratamiento de ortodoncia, de acuerdo con diferentes factores observados durante la fase diagnóstica.

REFERENTES TEÓRICOS

Reabsorción radicular y ortodoncia

La RR puede ser considerada una consecuencia iatrogénica común del tratamiento ortodóncico dada por cambios biológicos en el cemento y el ligamento periodontal, los cuales son inducidos por la concentración de fuerzas mecánicas nocivas que ocasionan que células multinucleadas destruyan los tejidos dentales radiculares (Beck y cols., 1994; Brezniak y Wasserstein, 2002; Chiqueto y cols., 2008; Darendeliler y cols., 2004; Faltin y cols., 2001, Levander y Malmgren, 1988). Usualmente, los dientes más afectados por la reabsorción radicular son los incisivos, probablemente por ser unirradiculares, porque son movidos con más frecuencia durante los tratamientos ortodóncicos o porque están más expuestos a factores

externos como traumas (Beck y cols., 1994; Chiqueto y cols., 2008; Vasconcelos Picanço y cols., 2013).

Generalmente, la RR es asintomática y, según Levander y Malmgren (1988), puede ser clasificada de acuerdo con su severidad de la siguiente manera:

- Grado 0: sin reabsorción.
- Grado 1: reabsorción leve, la raíz cuenta con longitud normal y solo presenta irregularidades apicales.
- Grado 2: reabsorción moderada, presenta una pequeña área con pérdida apical de hasta 2 mm y un contorno casi recto.
- Grado 3: reabsorción acentuada que está entre 2 mm hasta 1/3 de la longitud original de la raíz.
- Grado 4: reabsorción severa que va más allá de 1/3 de la longitud original de la raíz

La Figura 1 permite observar de manera gráfica la clasificación descrita anteriormente. La longitud radicular se mide desde el ápice hasta la unión cementoamélica, siguiendo el eje axial del diente (Vasconcelos Picanço y cols., 2013).

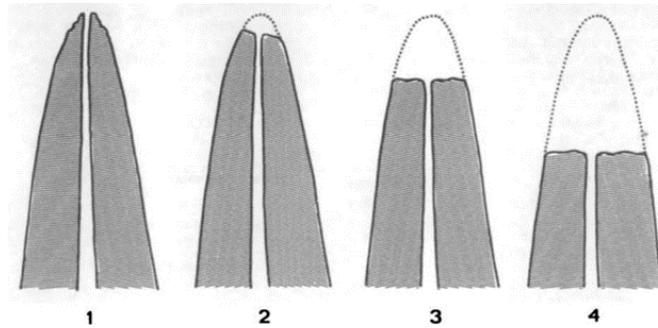


Figura 1. Clasificación de la severidad de la reabsorción radicular según Levander y Malmgren (1988). Esta figura fue publicada en el artículo original.

En los casos más severos, la función y retención del diente afectado se ve comprometida (Dudic y cols., 2009; Vasconcelos Picanço y cols., 2013). Según algunos estudios, cerca del 15% de los pacientes tratados ortodóncicamente presentan una reabsorción moderada a severa (Darendeliler y cols., 2004) y todos los pacientes presentan algún grado de reabsorción pues el movimiento ortodóncico no puede darse sin que haya remodelado a nivel radicular (Lopatiene y Dumbravaite, 2008).

En cuanto a los factores de riesgo para la aparición de la RR en adultos, la literatura menciona múltiples factores, algunos de los cuales están dados por la predisposición y genética del paciente a desarrollar procesos resorptivos, y otros guardan más relación con fuerzas externas y factores ambientales (Beck y cols., 1994; Brezniak y Wasserstein, 2002; Chiqueto y cols., 2008; Darendeliler y cols., 2004). Por esta razón, este proceso patológico ha sido considerado a través de los años como idiopático e impredecible (Darendeliler y cols., 2004).

Entre los factores que se ha considerado que influyen en la reabsorción radicular inducida por ortodoncia encontramos la duración y el tipo de tratamiento (con o sin extracciones), así como la longitud radicular inicial (Linge y cols., 1991; Vasconcelos

Picanço y cols., 2013). Incluso el vector y la magnitud de la fuerza ejercida para el movimiento dental se han estudiado como aspectos relacionados con el incremento del riesgo de reabsorción, principalmente la intrusión dental (Beck y cols., 1994; Chiqueto y cols., 2008; Darendeliler y cols., 2004). Por otro lado, la edad del paciente al iniciar el tratamiento parece ser importante para algunos autores (Vasconcelos Picanço y cols., 2013).

Otros factores que se han estudiado son el sexo, la sobremordida horizontal, las mecánicas empleadas durante el tratamiento, si el paciente tiene historia de trauma dentoalveolar, hábitos de interposición lingual, y la presencia de caninos retenidos (Chiqueto y cols., 2008; Linge y cols., 1991).

En cuanto a la forma de la raíz, esta se clasifica, según Levander y Malmgren (1988), en raíz corta, romboidea, con dilaceración y con punta de pipeta. Esta característica también parece guardar relación con la aparición de la RR, indicando que aquellos pacientes con raíces con forma de pipeta tienen un alto riesgo de aparición del evento, y un riesgo más moderado para raíces redondeadas o romboides (Levander y Malmgren, 1988).

Inteligencia artificial, modelos de predicción y ortodoncia

En los últimos años, el uso de las tecnologías de la información ha influenciado el desarrollo de diferentes áreas. La ortodoncia, como rama de la odontología, también se ha visto en la necesidad de adaptarse a los cambios que trae la era digital, la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático.

Según algunos estudios recientes, en ortodoncia la IA y los modelos de aprendizaje automático (ML) se han enfocado principalmente en la ubicación de puntos cefalométricos, la determinación del atractivo facial y la edad aparente en pacientes de cirugía ortognática, la toma de decisiones respecto a realizar o no extracciones para un tratamiento ortodóncico, la segmentación de modelos digitales y la evaluación de crecimiento y desarrollo en ayudas radiográficas. Para estos objetivos, se han utilizado redes neuronales, regresiones de vectores de soporte, máquinas de soporte vectorial, entre otros. (Büyük y cols. 2019; Bichu y cols., 2021, Mohammad-Rahimi y cols., 2021)

El uso del aprendizaje automático en ortodoncia se ha vuelto importante para obtener mejores resultados en más corto tiempo. Algunos modelos de predicción han buscado establecer estos resultados en el tratamiento ortodóncico, el pronóstico para los tratamientos de las maloclusiones clase III, la oclusión final en tratamientos con alineadores, entre otros (Akdeniz y Tosun, 2021).

Al hablar de la RR inducida por ortodoncia, diversos autores han contribuido notoriamente a establecer algunos factores de riesgo (Sameshima y Sinclair, 2001; Guo y cols., 2016; Lopatiene y Dumbravaite, 2008; Jung y Cho, 2011) y su asociación con la presencia de dientes retenidos (Alqerban y cols., 2015; Aleman y cols., 2020). Otros estudios se han enfocado en detectar polimorfismos genéticos y marcadores biológicos que permitan predecir la aparición del fenómeno (Yashin y cols., 2017; Mohd Zain y cols., 2022). Además, se conocen algunos estudios que han buscado predecir el riesgo de aparición del fenómeno en tratamientos de ortodoncia con diferentes técnicas, haciendo uso de radiografías panorámicas (Jiang y cols., 2010; Pereira y cols. 2015; Sharab y cols., 2015), periapicales (Årtun y cols., 2009), tomografías conebeam (Linkous y cols., 2021; Liu y cols., 2021) y

pruebas de laboratorio (Mohd Zain y cols., 2022; Pereira y cols. 2015; Sharab y cols., 2015), a través de modelos de regresión lineal univariados y múltiples, regresión de mínimos cuadrados parciales y regresiones logísticas paso a paso, logrando avances importantes para el desempeño clínico de los profesionales en ortodoncia.

METODOLOGÍA

Este estudio fue realizado empleando los datos publicados por Silva y cols. (2018), disponibles bajo licencia Creative Commons 4.0. El conjunto de datos caracteriza 195 pacientes de dos (2) clínicas de ortodoncia y de la Facultad de Medicina de la Universidad de Coimbra (Portugal), el procedimiento para selección de muestra y captura de datos es descrito por Pereira y cols. (2013) en una publicación previa e incluye pacientes caucásicos con tratamientos de ortodoncia finalizados, seguimiento radiográfico adecuado antes y después del tratamiento, incisivos y caninos completamente formados, ausencia de fracturas, abrasión o caries en los bordes incisales, ausencia de alteraciones en la morfología radicular, malformaciones craneofaciales y alteraciones congénitas dentales de forma, número y erupción (supernumerarios, agenesias, retenciones e impactaciones).

En total, el conjunto de datos cuenta con dieciocho (18) variables, entre las cuales se encuentran datos clínicos, genéticos, de tratamiento y los porcentajes de reabsorción radicular de los seis (6) dientes anterosuperiores, obtenidos a través de la relación del acortamiento de las raíces entre la toma de la radiografía inicial y final. Las fórmulas

matemáticas empleadas por Pereira y cols. para calcular el porcentaje de reabsorción final fueron:

$$CF = C1/C2 \quad (1)$$

$$CR2 = R2/CF \quad (2)$$

$$\%EARR = 1 - (CR2/RI) \quad (3)$$

Donde, CF es el factor de corrección empleado para compensar la distorsión radiográfica por cambios de inclinación durante el tratamiento; $C1$ = longitud inicial de la corona dental; $C2$ = longitud final de la corona dental; RI = longitud inicial de la raíz; $R2$ = longitud final de la raíz; $CR2$ = tamaño final de la raíz; $CR2/RI$ = proporción de raíz remanente; $\%EARR$ = proporción de raíz reabsorbida.

Para la preparación y el análisis de datos, así como para el entrenamiento y análisis de los modelos, se utilizaron Google Colab, el lenguaje de alto nivel de programación Python (versión 3.7) y las librerías SweetViz (versión 2.1.3) y Pycaret (versión 2.3.10).

Preparación de los datos

Inicialmente se comprobó que no existieran datos faltantes dentro del conjunto de registros analizados. Posteriormente, fueron eliminados cuatro (4) registros que presentaban una sobremordida horizontal mayor a 15 mm debido a que superan los límites biológicos para tratamientos con ortodoncia y ortopedia establecidos por Graber y cols. (2013). A continuación, y dado que el interés de este estudio fue realizar un modelo que le permita al ortodoncista predecir la severidad de la reabsorción radicular que puede ocurrir en un paciente dadas unas condiciones clínicas y de tratamiento establecidas, no fueron tenidas en

cuenta las variables genéticas del conjunto de datos. Asimismo, se tuvo en cuenta el porcentaje máximo de reabsorción radicular entre los seis (6) dientes anteriores para cada paciente y se transformó la variable en 2 categorías (leve y moderada/severa), esta categorización se usó teniendo en cuenta la clasificación establecida por Levander y Malmgren y el tamaño radicular promedio para los dientes estudiados (Esponda, 2002). La categoría leve representó aquellos casos que presentan una reabsorción radicular menor a 2 mm (aproximadamente 15% sobre una longitud radicular media de 14 mm), los casos de mayor severidad se agruparon en la categoría moderada/severa.

En la Tabla 1 se describen las demás variables incluidas y las redefiniciones a las que fueron sometidas.

Variable	Descripción	Redefinición
OIEARRmax	Máximo porcentaje de reabsorción radicular entre los seis dientes anterosuperiores	Se convierte en variable categórica (Severity): <ul style="list-style-type: none"> ● Si OIEARRmax \leq 15, Severity = 0 (leve) ● Si OIEARRmax $>$ 15, Severity = 1 (severa)
Age	Edad en años	Se observa sesgo a la derecha. Se aplica logaritmo base 10 (Age_log10)
Duration	Duración del tratamiento en meses	Se convierte en años (DurationYears)
Overjet	Distancia entre la superficie palatina de los dientes anterosuperiores y la superficie vestibular de los dientes anteroinferiores en mm	No se aplica ningún tipo de transformación.
Gender	Sexo	Se recategoriza (GenderT): <ul style="list-style-type: none"> ● Masculino = 0 ● Femenino = 1
AnteriorOB	Presencia de mordida abierta anterior	Se recategoriza (AnteriorOBT) <ul style="list-style-type: none"> ● No = 0 ● Sí = 1
PMextraction	Indica si el tratamiento fue realizado con extracciones de premolares	Se recategoriza (PMextraction) <ul style="list-style-type: none"> ● No = 0 ● Sí = 1
HyraxApp	Indica si el tratamiento requirió el uso de aparato Hyrax	Se recategoriza (HyraxAppT) <ul style="list-style-type: none"> ● No = 0 ● Sí = 1
FunctionalApp	Indica si el tratamiento requirió el uso de aparatos funcionales fijos	Se recategoriza (FunctionalAppT) <ul style="list-style-type: none"> ● No = 0 ● Sí = 1
TongueThrust	Presencia de hábito de interposición lingual	Se recategoriza (TongueThrustT) <ul style="list-style-type: none"> ● No = 0 ● Sí = 1
skeletalPattern	Maloclusión esquelética que presenta el paciente	Clase I = 1 Clase II = 2 Clase III = 3

Tabla 1. Variables incluidas en la modelación

Análisis de los datos

Se realizó un análisis univariado para obtener las medidas de tendencia central y de dispersión para las variables numéricas y frecuencias para las variables categóricas. Adicionalmente, se realizó un análisis de las variables explicativas en relación con la variable dependiente. Los análisis de correlaciones y asociaciones también fueron considerados para evaluar el comportamiento de los datos y disminuir el riesgo de fuga de etiqueta.

Elaboración del modelo

El conjunto de datos se dividió en datos de entrenamiento (80%) y de testeo (20%). Se entrenaron diferentes modelos de aprendizaje automático supervisado para evaluar y comparar su desempeño, buscando establecer cuál es el mejor modelo. La librería utilizada para el entrenamiento permitió controlar el balance de las clases. Dada la importancia de la sensibilidad para la detección de los casos moderados/severos, se entrenaron los modelos y luego fueron ajustados (tuning) haciendo énfasis en el Recall; se tuvieron en cuenta aquellos que con o sin ajuste presentaron mejores resultados. Finalmente, se emplearon las métricas de evaluación (accuracy, F1 score, precision y recall) en los datos de testeo, buscando establecer cuál es el mejor modelo posible para la predicción de la aparición RR moderada/severa durante el tratamiento ortodóncico. Estas métricas se construyen a partir de la matriz de confusión bajo las ecuaciones presentadas a continuación:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (5)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

$$F1 = 2 \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

Donde, TP = verdaderos positivos, TN = verdaderos negativos, FP = falsos positivos, FN = falsos negativos.

RESULTADOS

Análisis descriptivo exploratorio

En primer lugar, se realizó un análisis de normalidad de los 191 registros, con lo cual se estableció que los datos no presentan una distribución normal según la prueba de Kolmogorov Smirnov ($p\text{-value} < 0.05$). Posteriormente, se realizó un análisis de cada variable para evaluar su comportamiento, encontrando así que la variable OIEARRmax obtuvo una mediana de 15.89% (RIQ = 12.95), con un porcentaje mínimo de 1.9% y máximo de 49.65%. La variable Severity mostró que la mayor prevalencia la obtuvo la RR moderada/severa (55%). Las Figuras 2a y 2b muestran el histograma de la variable OIEARRmax y el gráfico de barras para la variable Severity, donde es posible observar la asimetría a la derecha del porcentaje máximo de reabsorción y el balance de las clases tras la categorización. Para las demás variables cuantitativas, la mediana edad de los pacientes fue de 15 años (RIQ = 5), la duración del tratamiento de 2.92 años (RIQ = 1.17) y el overjet fue de 3 mm (RIQ = 3).

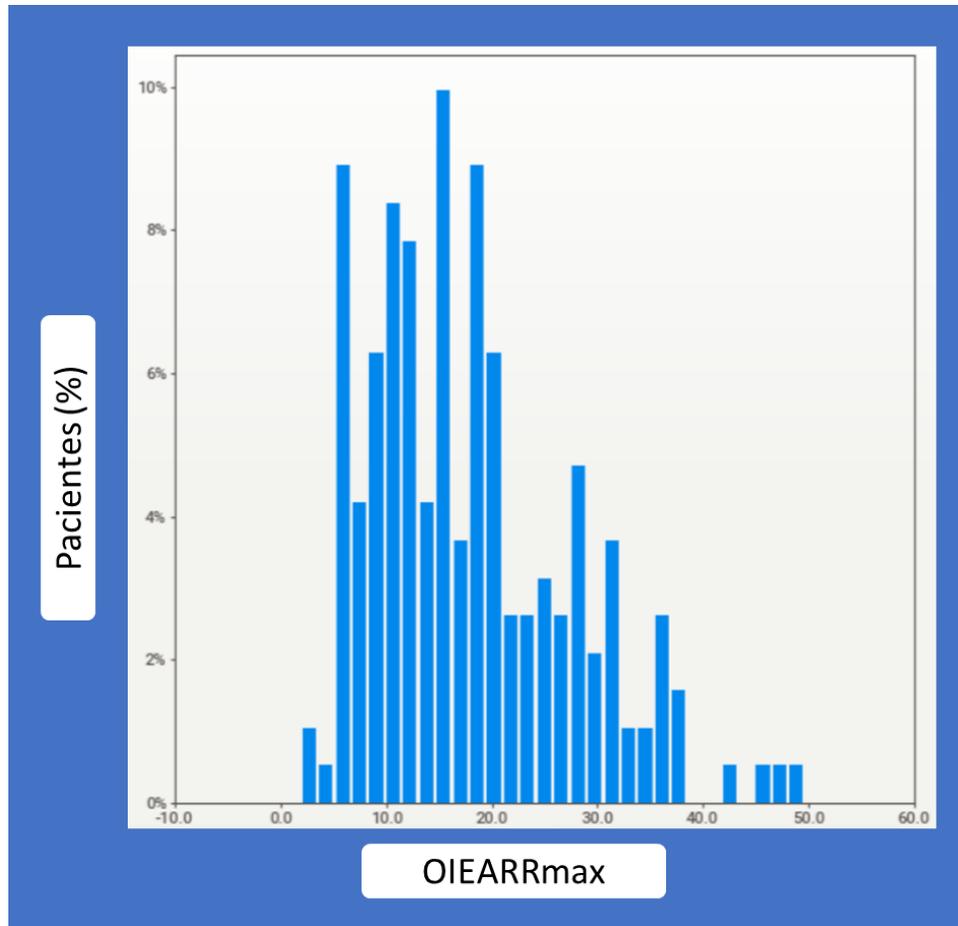


Figura 2a. Histograma variable OIEARRmax

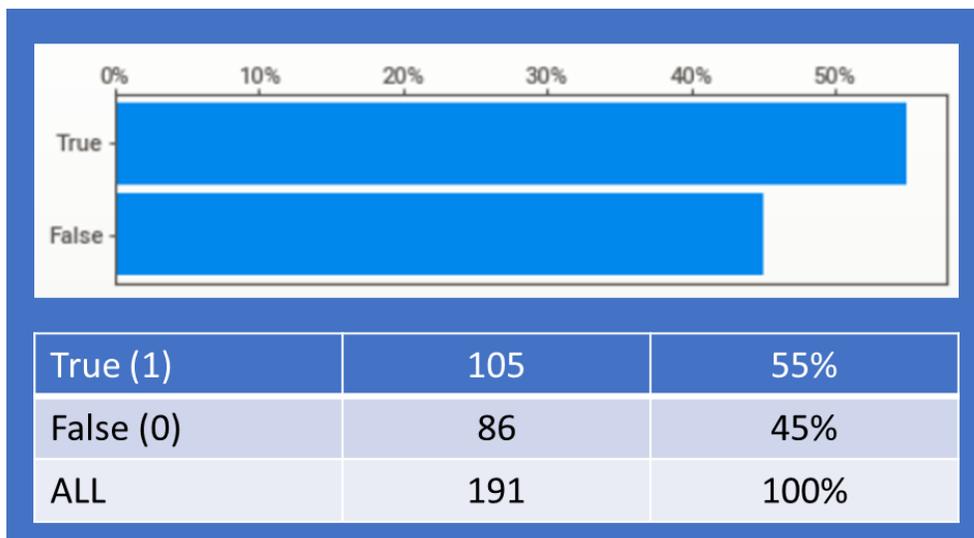


Figura 2b. Gráfico de barras variable Severity, donde True = moderada/severa y False = leve.

Al evaluar las variables categóricas se encontró que el sexo más prevalente fue el femenino (63%), la maloclusión esquelética más frecuente fue la Clase I (51%) y la menos común fue la Clase III (9%). Por otro lado, solo el 30% de los pacientes presentó hábito de interposición lingual. En general, los tratamientos no incluyeron extracciones de premolares (70%), aparatos Hyrax (93%) ni aparatos funcionales (95%).

La Figura 3 presenta las asociaciones y correlaciones entre las variables. La variable Severity presentó una mayor asociación con la DurationYears ($r = 0.33$), lo cual guarda relación con otros estudios que manifiestan que la duración de la aplicación de la fuerza es uno de los factores de riesgo para la aparición de RR (Topkara y cols., 2012; Segal y cols., 2004; Maués y cols., 2015; Mohandesan y cols., 2007). En este caso, la duración del tratamiento fue de 2.96 años (SD 0.84), pudiéndose observar que la aparición de casos con reabsorciones radiculares de mayor severidad se dio a partir de los 1.9 años de tratamiento, con una mayor tendencia de incremento desde los 3 años y superando un 80% de prevalencia a partir de los 4 años, como se observa en la Figura 3. También se observó una asociación positiva con la variable OverJet ($r = 0.11$), en concordancia con lo reportado por Maués y cols. (2015), quienes manifiestan que los pacientes que presentan un overjet mayor a 5 mm tienen mayor riesgo de presentar RR. El presente estudio mostró que los casos más severos tienen mayor prevalencia con una sobremordida horizontal menor a 0 mm y mayor a 5 mm. Las demás variables obtuvieron asociaciones muy bajas ($r < 0.1$).

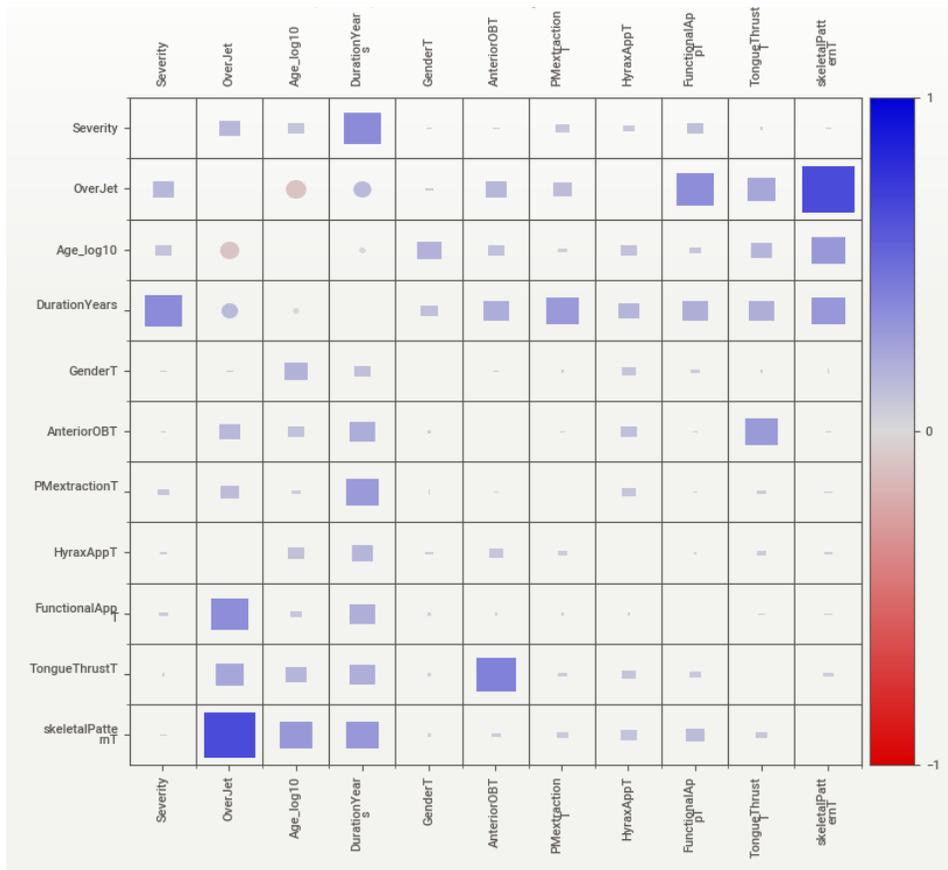


Figura 3. Gráfico de correlaciones y asociaciones. Los cuadros representan asociaciones categóricas (coeficiente de entropía asimétrico y ratio de correlación), con un rango de 0 a 1. Los círculos son las correlaciones de Pearson, con un rango de -1 a 1.

Al evaluar Age_log10, esta variable mostró que, a partir de los 19.95 años hay mayor cantidad de casos moderados/severos. Esta variable también presentó una correlación negativa con OverJet ($r = -0.15$), lo cual guarda relación con el proceso natural de crecimiento donde a mayor edad, menor se espera que sea la distancia entre los dientes maxilares y mandibulares (Björk, 1953).

La variable que presentó una mayor cantidad de asociaciones significativas fue OverJet. entre las cuales es posible establecer una relación con el patrón esquelético ($r =$

0.64), la cual se explica por el hecho de que la distancia que existe entre los dientes maxilares y mandibulares se ve alterada por el tamaño y la posición de sus respectivas bases óseas, en general, los pacientes clase II presentan sobremordidas más aumentadas y los clase III están disminuidas o con valores negativos, en la literatura algunos estudios han estudiado esta relación (Lombargo y cols., 2012; Ifesanya y cols., 2020). Por otro lado, la asociación entre el overjet y el uso de aparatología funcional ($r = 0.32$) se debe a que este tipo de aparatos están diseñados para realizar la corrección de relaciones esqueléticas donde el overjet también se ve comprometido (Collett, 2000; Rizell y cols., 2006). De igual manera, la asociación entre el overjet y el hábito de interposición lingual ($r = 0.20$) se debe a que un incremento en esta medida puede ser el resultado de presentar el hábito por largo tiempo y con una alta frecuencia (Jalaly y cols., 2009).

Finalmente, la Tabla 2 muestra las categorías en las cuales se presentó mayor severidad de reabsorción:

Categoría	Porcentaje
Uso de aparato funcional fijo = Sí	89%
Uso de aparato Hyrax = Sí	79%
Extracción de premolares = Sí	72%
Mordida abierta anterior = Sí	68%
Sexo = Hombre	63%
Patrón esquelético <i>Clase II</i>	62%
<i>Case III</i>	59%

Tabla 2. Categorías con mayor prevalencia de reabsorción radicular moderada/severa

Considerando que la población con RR moderada/severa es del 55%, estas categorías pueden ser importantes para el modelo de clasificación, sin embargo, la duración del tratamiento sigue teniendo una mayor asociación según la matriz de asociaciones y correlaciones presentada anteriormente.

Modelación

Dado que la variable que se encontró más asociada con la variable de estudio, y que la literatura la reporta como uno de los factores de riesgo más correlacionados es el tiempo de tratamiento (Segar, Schiffman y Tuncay, 2004), se creó un modelo basado en reglas que establece que todos los pacientes que tengan una duración de tratamiento superior a 3 años presentan una reabsorción radicular moderada/severa, de acuerdo con lo descrito por Maués y cols. (2015) y los hallazgos descritos previamente. Este modelo es considerado el modelo base. La Figura 4 muestra el histograma de la variable DurationYears y la frecuencia relativa de casos moderados/severos.

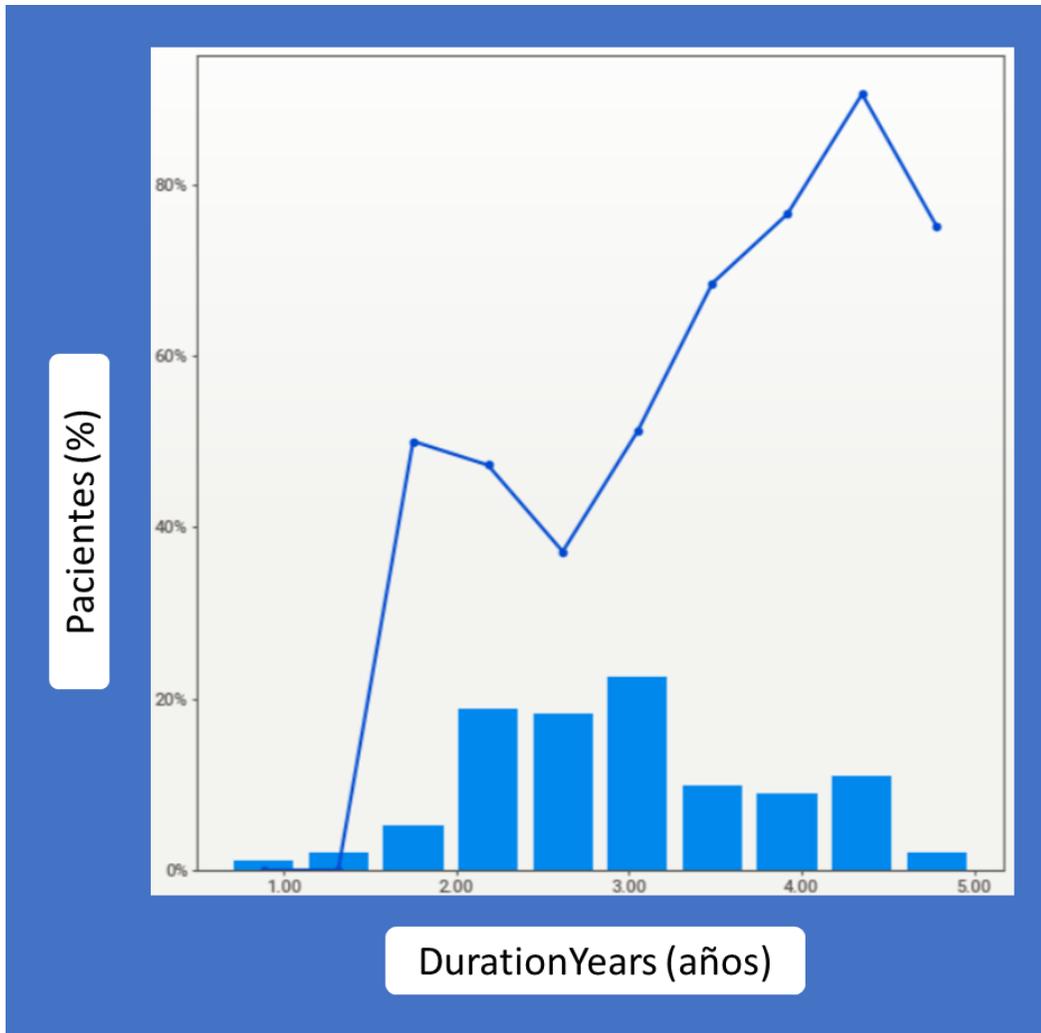


Figura 4. Histograma DurationYears. La línea azul representa la frecuencia relativa (en porcentaje) para los casos de RR moderada/severa.

La Tabla 3 muestra un comparativo de las métricas de evaluación de los mejores cuatro (4) modelos de aprendizaje automático y el modelo base.

Modelo	Accuracy	AUC	Recall	Precision	F1
Logistic Regression (tuned)	0.6873	0.7103	0.6700	0.7720	0.6817
Extra Trees Classifier (no tuned)	0.5755	0.5461	0.6233	0.6198	0.6170
Base (no tuned)	0.6154	0.6190	0.6153	0.6257	0.6169
Decision Tree Classifier (no tuned)	0.6373	0.6392	0.6133	0.6824	0.6388
Linear Discriminant Analysis (no tuned)	0.6618	0.7195	0.6067	0.7488	0.6540

Tabla 3. Modelos de aprendizaje automático para predecir la severidad de la reabsorción radicular, ordenados por Recall mayor a menor; AUC = area under the curve.

En la tabla anterior, es posible observar, que el modelo con mejores métricas en general es la regresión logística ajustada. En la Figura 5 se observan las matrices de confusión para los modelos de aprendizaje automático.

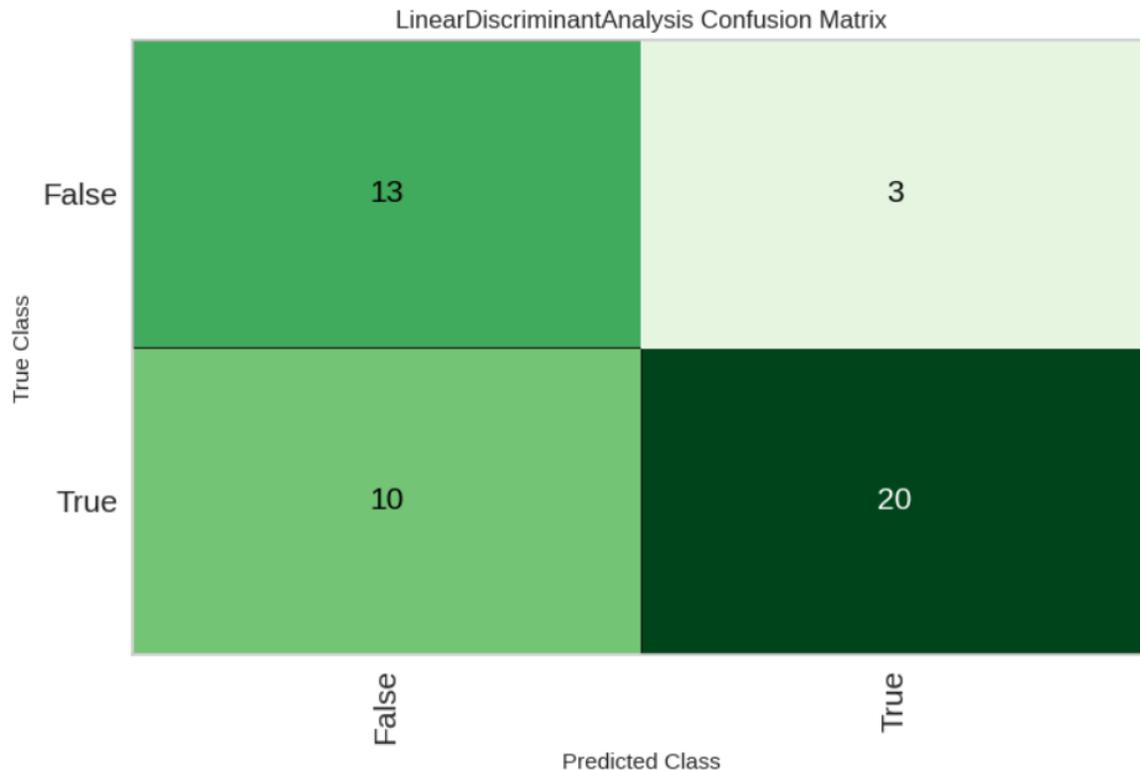


Figura 5. Matrices de confusión para el análisis discriminante lineal (LDA), donde True Class = clase real; Predicted Class = clase predicha por el modelo

Las matrices de confusión permiten visualizar el desempeño de los modelos para predecir las clases de interés. Dados los resultados, es posible observar que el análisis discriminante lineal es el modelo que presentó un mejor comportamiento dadas las necesidades del estudio pues obtuvo la mayor proporción de verdaderos positivos y verdaderos negativos, a la vez que presentó menos falsos negativos y verdaderos negativos, sugiriendo que la sensibilidad para la detección de casos moderados/severos es mayor; sin embargo, aún se subestiman el 33% de los casos (10 de los 30 casos con RR moderada/severa fueron predichos como leves). Tanto la regresión logística como el análisis discriminante presentaron una buena capacidad para diferenciar entre clases, como se observó en el AUC.

La Figura 6 presenta la curva de aprendizaje para el análisis discriminante lineal, donde se observó que el puntaje tiende a incrementar a medida que se agregan más registros de datos al análisis, sin embargo, se podría esperar que agregar más datos no represente una variación significativa en el aprendizaje para el modelo dada la estabilidad observada a partir de alrededor de 70 elementos.

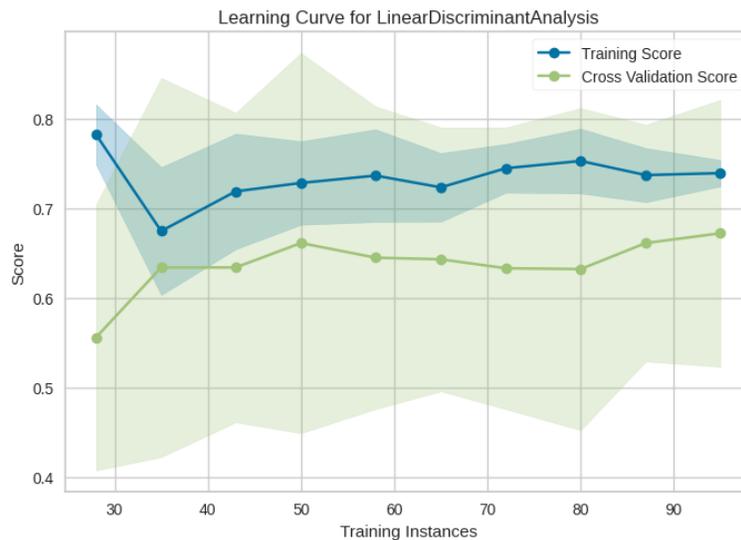


Figura 6. Curva de aprendizaje para el modelo de análisis discriminante lineal

Finalmente, la Figura 7 muestra la importancia de las variables para la construcción del modelo seleccionado. En este caso, la categoría más relevante fue el uso de aparatos funcionales; todas las demás categorías se vieron reflejadas en el listado de las 10 más importantes, con excepción del OverJet. La ausencia de hábito de interposición lingual también fue una variable importante, sin embargo, al evaluar la proporción de casos moderados/severos para las dos categorías de la variable, la diferencia fue solo del 4% (No = 54%; Sí = 58%).

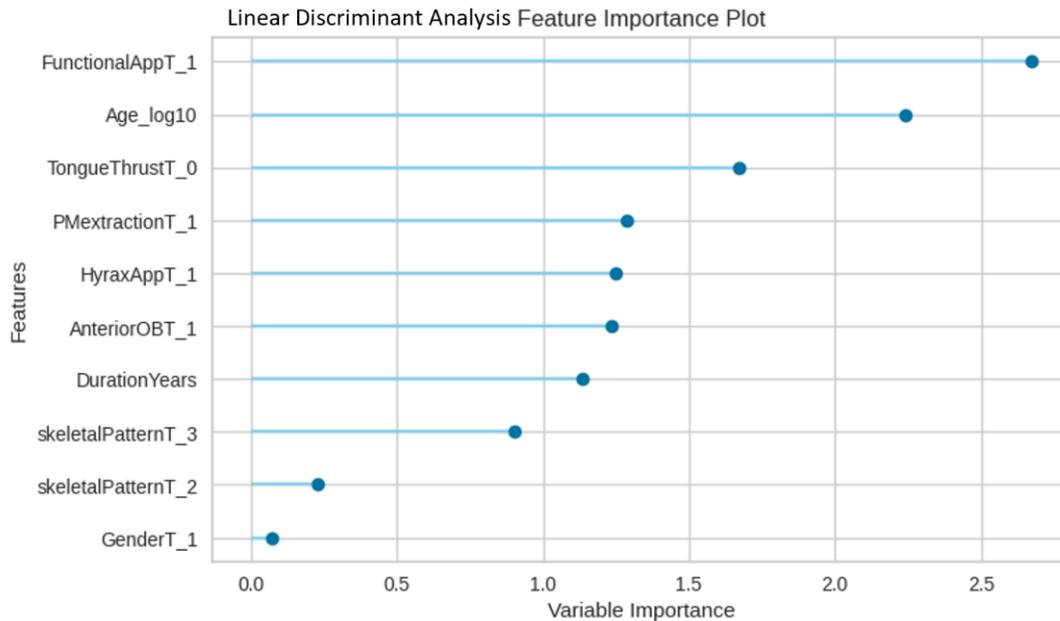


Figura 7. Gráfico de importancia de las características en el modelo de análisis discriminante lineal

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La necesidad de crear una estrategia para la predicción de un fenómeno complejo y multifactorial como la RR ha permitido que diferentes autores hagan uso de los referentes teóricos disponibles para la construcción de modelos a partir de los factores de riesgo reportados a través de la historia. Los resultados de los esfuerzos de los investigadores para predecir la RR en pacientes de ortodoncia han permitido crear diferentes modelos. Para algunos autores, la influencia genética en la aparición de la alteración de la superficie radicular ha sido importante. Sharab y cols. (2015) estudiaron los factores genéticos y de tratamiento asociados a la ortodoncia en 67 pacientes caucásicos a través de una regresión logística paso a paso. Este método les permitió establecer que las variables analizadas explicaron un 25% de la varianza asociada a la RR y la importancia del estudio genético de genotipos específicos como P2RX7 (rs208294).

Por otro lado, Pereira y cols. (2015), realizaron un modelo de regresión lineal múltiple y encontraron que 5 variables clínicas de tratamiento podían explicar el 28% de la varianza de su variable objetivo: sexo, duración de tratamiento, mordida abierta anterior, extracción de premolares y uso de aparatos Hyrax. Otras variables como la edad, el hábito de interposición lingual, el overjet y el patrón esquelético fueron menos significativas. Las variables presentadas fueron incluidas en este trabajo.

Linkous y cols. (2020), realizaron un estudio con tomografías conebeam en 93 adolescentes blancos americanos, elaborando modelos de regresión lineal múltiple con R^2 entre 77% y 86%. Estos modelos indicaron que la dirección del movimiento influye en la RR, y que la intrusión es el movimiento más dañino.

Liu y cols. (2021), evaluaron los factores de riesgo y elaboraron un modelo de regresión lineal múltiple en 40 pacientes caucásicos con tratamiento de ortodoncia removible con alineadores. Sus resultados evidenciaron que todos los pacientes presentaron pérdida de volumen de aproximadamente $11.48 \pm 6.7 \text{ mm}^3$; en este caso la prevalencia de RR severa fue solo del 0.625%. El modelo planteado obtuvo R^2 de 0.51. Las variables edad, sexo, duración del tratamiento, RR previa al tratamiento, entre otras, fueron excluidas del modelo.

Mohd-Zain y cols. (2022), reportaron un accuracy del 88% en un modelo de clasificación con el algoritmo de análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales para predecir grupos sin y con reabsorciones leves, estudiando la dentina sialofosfoproteína

(DSPP), obtenida del fluido crevicular y medida mediante pruebas ELISA, para una muestra de 30 pacientes divididos en 3 grupos.

En el presente estudio se buscó crear un modelo de predicción que le permita al ortodoncista, solo con datos clínicos y la evaluación de algunas alternativas y duración del tratamiento, predecir la severidad de la RR que puede presentar el paciente de ortodoncia durante su proceso. Para lo anterior, se evaluaron un modelo basado en reglas y cuatro (4) modelos de aprendizaje automático, concluyendo que el mejor modelo posible entrenado con 191 registros y 10 variables fue el análisis discriminante lineal; otro de los modelos evaluados fue el análisis de regresión lineal, utilizado por otros autores (Sharab y cols., 2015). El método LDA hace uso del teorema de Bayes y estima la probabilidad de que una observación pertenezca a una de las clases de la variable cualitativa; posteriormente, se asigna dicha observación a la clase k para la cual la probabilidad predicha es mayor (Rodrigo, 2016). El desempeño de este modelo fue evaluado mediante métricas diseñadas para modelos de clasificación y haciendo uso de la matriz de confusión, obteniendo como resultado una sensibilidad del 60.67% y una precisión del 74.88% para la detección de casos moderados/severos, superiores a las obtenidas por Liu y cols. (2021), quizá por el hecho de que estos autores excluyeron variables como la edad y la duración del tratamiento.

Al medir el comportamiento del modelo mediante la matriz de confusión, se pudo observar que este detecta correctamente un 87% los casos leves y sobreestima solo un 13%, por lo que el ortodoncista podría iniciar el tratamiento esperando un buen pronóstico radicular al finalizar el mismo. Sin embargo, solo un 67% de los casos moderados/severos fueron categorizados adecuadamente, mientras que el 33% de estos fueron predichos como leves

(subestimados). Esta última afirmación implica que el ortodoncista podría no estar tomando las medidas de seguimiento clínico y radiográfico necesarias para disminuir el riesgo de reabsorción radicular en 1/3 de los pacientes que realmente lo pueden requerir, incrementando la posibilidad de que aumente la severidad y, en consecuencia, puedan existir pérdidas dentales. La pérdida dental puede incurrir en gastos terapéuticos de rehabilitación muy superiores (alrededor de 4'000.000 COP por diente) a los costos económicos de una radiografía panorámica de seguimiento trimestral (aprox. 80.000 COP por año).

La viabilidad de considerar aplicar un protocolo radiográfico trimestral para todos los pacientes con tratamiento ortodóncico es limitada dado que esto tiene un costo biológico para el paciente. Brooks sugiere que todos los rayos x tienen el potencial de hacer daño a los tejidos, incluso en pequeñas cantidades, por lo tanto, es responsabilidad de los odontólogos hacer uso de esas de manera inteligente (2008), lo que invita a buscar estrategias para que el profesional pueda actuar con tranquilidad, dosificando las radiaciones al máximo posible. Okano y Sur (2010) indican que una radiografía panorámica provee alrededor de 15 μ Sv usando equipos contemporáneos con sensor digital, lo cual es el equivalente a 2-3 días de radiación en exteriores; la tomografía cone-beam tiene una radiación que puede ser menor de 100 μ Sv para áreas limitadas y 500 - 700 μ Sv para el rostro completo; asimismo, la exposición aguda a radiaciones mayores que 10-50 mSv incrementa el riesgo de cáncer. Para la World Nuclear Association la dosis mínima de radiación a la cual incrementa el riesgo de cáncer, se ha establecido en 100 mSv (2015). Algunos estudios de los presentados anteriormente lograron métricas superiores al de este estudio con el uso de tomografías conebeam y pruebas de laboratorio (Linkous y cols., 2020; Mohd-Zain y cols., 2022), sin

embargo, estas ayudas deberían ser consideradas con mesura dado que no son de uso frecuente durante la consulta por los costos biológicos y económicos que implican, además de no resultar prácticos para la predicción durante el ejercicio diario de la consulta ortodóncica.

Al igual que en el presente estudio, los autores han concluido que variables como la duración del tratamiento (Sharab y cols., 2015; Pereira y cols., 2015), la extracción de premolares (Sharab y cols., 2015; Rou y cols., 2010; Linkous y cols., 2020; Pereira y cols., 2015) y la edad (Rou y cols., 2010) son algunos de los factores que más influyen en el modelo de predicción. El género parece no tener gran influencia en la reabsorción radicular (Rou y cols., 2010), pero otras variables como el grado de reabsorción previa al tratamiento (Rou y cols., 2010; Liu y cols., 2021) y antecedentes de traumas dentoalveolares (Årtun y cols., 2009) son relevantes.

A pesar de todos los hallazgos descritos anteriormente, un modelo que permita hacer la predicción con mayor exactitud la predisposición a RR moderadas/severas mediante variables netamente clínicas y con ayudas diagnósticas accesibles para la práctica diaria, siguen siendo necesarios. Métricas de sensibilidad y precisión en salud que sean superiores a 80 son consideradas aceptables (Vizcaíno-Salazar, 2017).

CONCLUSIONES

- Se desarrolló un modelo automático de clasificación con una sensibilidad del 60.67% y una precisión del 74.88% para la detección de casos moderados/severos empleando el método del análisis lineal discriminante.

- Las variables más influyentes obtenidas en la creación de un modelo de clasificación predictivo para establecer la severidad de la RR en un paciente que inicia ortodoncia incluyen la edad, la duración del tratamiento, el uso de aparatología funcional y dispositivos Hyrax, la presencia de mordida abierta y los tratamientos con extracciones.
- La creación de nuevos modelos que incluyan un mayor tamaño muestral y otras variables presentadas por la literatura como factores de riesgo tales como los antecedentes de trauma dentoalveolar, la presencia de acortamiento radicular previo, antecedentes de ortodoncia, consumo de medicamentos y enfermedades sistémicas, podría permitir una mayor sensibilidad y especificidad en las predicciones, brindándole al profesional confiar en los resultados y obrar en consecuencia.
- Si bien existen modelos con reportes de precisión y exactitud altos, estos emplean pruebas de laboratorio y ayudas diagnósticas que pueden no ser de fácil acceso para todos los pacientes y profesionales, así como mayores grados de radiación. El modelo aquí presentado cumple con la característica de fácil acceso a la información para realizar la predicción, sin embargo, se requieren métricas superiores a 80 para ser utilizado con mayor seguridad durante la consulta como apoyo diagnóstico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akdeniz, S. y Tosun, M. E. (2021). A review of the use of artificial intelligence in orthodontics. *Journal of Experimental and Clinical Medicine*, 38(SI-2). doi:10.52142/omujecm.38.si.dent.13.

Alemam, A. A., Abu Alhaija, E. S., Mortaja, K., y AlTawachi, A. (2020). Incisor root resorption associated with palatally displaced maxillary canines: Analysis and prediction using discriminant function analysis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 157(1), 80–90. doi:10.1016/j.ajodo.2019.08.008

Alqerban, A., Jacobs, R., Fieuws, S., y Willems, G. (2015). Predictors of root resorption associated with maxillary canine impaction in panoramic images. *The European Journal of Orthodontics*, 38(3), 292–299. doi:10.1093/ejo/cjv047

Årtun, J., Van 't Hullenaar, R., Doppel, D., y Kuijpers-Jagtman, A. M. (2009). Identification of orthodontic patients at risk of severe apical root resorption. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135(4), 448–455. doi:10.1016/j.ajodo.2007.06.012

Baumrind, S., Korn, E. L., y Boyd, R. L. (1996). Apical root resorption in orthodontically treated adults. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 110(3), 311–320. doi:10.1016/s0889-5406(96)80016-3.

Beck, B. W., Harris, E. F., y Memphis, T. (1994). Apical root resorption in orthodontically treated subjects: Analysis of edgewise and tight wire mechanics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 105(4), 350–361.

Bichu, Y. M., Hansa, I., Bichu, A. Y., Premjani, P., Flores-Mir, C., y Vaid, N. R. (2021). Applications of artificial intelligence and machine learning in orthodontics: a scoping review. *Progress in orthodontics*, 22(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00361-9>

Björk, A. (1953). Variability and age changes in overjet and overbite. *American Journal of Orthodontics*, 39(10), 779–801. doi:10.1016/0002-9416(53)90084-0

Brezniak, N., y Wasserstein, A. (2002). Orthodontically Induced Inflammatory Root Resorption. Part I: The Basic Science Aspects. *Angle Orthodontist*, 72(2).

Brooks, S.L. (2008). Radiation Doses of Common Dental Radiographic Examinations: A Review. *Acta stomatologica Croatica*, 42 (3), 207-217. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/26709>

Büyük, S. K., y Hatal, S. (2019). Artificial intelligence and machine learning in orthodontics. *Ortadoğu Tıp Dergisi*, 11(4), 517-523. <https://doi.org/10.21601/ortadogutipdergisi.547782>

Chiqueto, K., Martins, D. R., y Janson, G. (2008). Effects of accentuated and reversed curve of Spee on apical root resorption. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 133(2), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.01.050>

Collett, A. R. (2000). Current concepts on functional appliances and mandibular growth stimulation. *Australian Dental Journal*, 45(3), 173–178. doi:10.1111/j.1834-7819.2000.tb00553.x

Darendeliler, M., Kharbanda, O., Chan, E., Srivicharnkul, P., Rex, T., Petocz, P., Swain, M., Jones, A., y Ekm, C. (2004). Root resorption and its association with alterations in physical properties, mineral contents and resorption craters in human premolars following application of light and heavy controlled orthodontic forces Structured. *Orthod Craniofacial Res*, 7, 79–97.

Dudic, A., Giannopoulou, C., Leuzinger, M., y Kiliaridis, S. (2009). Detection of apical root resorption after orthodontic treatment by using panoramic radiography and cone-beam computed tomography of super-high resolution. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135(4), 434–437. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2008.10.014>

Esponda Vila, R. (2002). *Anatomía dental (7.a ed.)*. Facultad de Odontología, UNAM.

Fernandes, L. Q. P., Figueiredo, N. C., Montalvany Antonucci, C. C., Lages, E. M. B., Andrade, I., y Capelli Junior, J. (2019). Predisposing factors for external apical root resorption associated with orthodontic treatment. *Kjod*, 49(5), 310–318. <https://doi.org/10.4041/kjod.2019.49.5.310>.

Graber, L. W., Vanarsdall, R. L. y Vig, K. W. (2013). *Ortodoncia: principios y técnicas actuales* (5.a ed.). Elsevier.

Guo, Y., He, S., Gu, T., Liu, Y., y Chen, S. (2016). Genetic and clinical risk factors of root resorption associated with orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 150(2), 283–289. doi:10.1016/j.ajodo.2015.12.028

Ifesanya, J. U., Adeyemi, A. T., y Otuyemi, O. D. (2020). Overjet as a Predictor of Skeletal Base Discrepancy among Nigerians with Malocclusion. *West African Journal of Orthodontics*, 2(1), 20-24. Retrieved from <https://wajo.oauife.edu.ng/index.php/wajo/article/view/16>

Jalaly, T., Ahrari, F., y Amini, F. (2009). Effect of tongue thrust swallowing on position of anterior teeth. *Journal of dental research, dental clinics, dental prospects*, 3(3), 73–77. <https://doi.org/10.5681/joddd.2009.019>

Jiang, R. -p., McDonald, J. P., y Fu, M. -k. (2010). Root resorption before and after orthodontic treatment: a clinical study of contributory factors. *The European Journal of Orthodontics*, 32(6), 693–697. doi:10.1093/ejo/cjp165

Jung, Y.-H., y Cho, B.-H. (2011). External root resorption after orthodontic treatment: a study of contributing factors. *Imaging Science in Dentistry*, 41(1), 17. doi:10.5624/isd.2011.41.1.17

Kaley, J., y Phillips, C. (1991). Factors related to root resorption in edgewise practice. *The Angle Orthodontist*, 61(2), 125–132. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1991\)061<0125:FRTRRI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1991)061<0125:FRTRRI>2.0.CO;2)

Linge, L., Ohm Linge, B., y Skien, D. (1991). Patient characteristics and treatment variables associated with apical root resorption during orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 1991, 35–43.

Linkous, E. R., Trojan, T. M., y Harris, E. F. (2020). External apical root resorption and vectors of orthodontic tooth movement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. doi:10.1016/j.ajodo.2019.10.017

Liu, W., Shao, J., Li, S., Al-balaa, M., Xia, L., Li, H., y Hua, X. (2021). Volumetric cone-beam computed tomography evaluation and risk factor analysis of external apical root resorption with clear aligner therapy. *The Angle Orthodontist*, 91(5), 597–603. <https://doi.org/10.2319/111820-943.1>

Lombardo, L., Sgarbanti, C., Guarneri, A., y Siciliani, G. (2012). Evaluating the Correlation between Overjet and Skeletal Parameters Using DVT. *International journal of dentistry*, 2012, 921942. <https://doi.org/10.1155/2012/921942>

Lopatiene, K., y Dumbraivaite, A. (2008). Risk factors of root resorption after orthodontic treatment. *Stomatologija*, 10(3), 89–95.

Maués, C. P. R., Nascimento, R. R. do, y Vilella, O. de V. (2015). Severe root resorption resulting from orthodontic treatment: Prevalence and risk factors. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 20(1), 52–58. <https://doi.org/10.1590/2176-9451.20.1.052-058.oar>

Mohandesan, H., Ravanmehr, H., y Valaei, N. (2007). A radiographic analysis of external apical root resorption of maxillary incisors during active orthodontic treatment. *The European Journal of Orthodontics*, 29(2), 134–139. doi:10.1093/ejo/cjl090

Mohammad-Rahimi, H., Nadimi, M., Rohban, M. H., Shamsoddin, E., Lee, V. Y., y Motamedian, S. R. (2021). Machine learning and orthodontics, current trends and the future opportunities: A scoping review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 160(2), 170–192.e4. doi:10.1016/j.ajodo.2021.02.013

Mohd Zain, M.N., Md Yusof, Z., Basri, K.N. et al. Multivariate versus univariate spectrum analysis of dentine sialophosphoprotein (DSPP) for root resorption prediction: a clinical trial. *BMC Oral Health* 22, 151 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02178-2>

Motokawa, M., Terao, A., Kaku, M., Kawata, T., Gonzales, C., Darendeliler, M. A., y Tanne, K. (2013). Open bite as a risk factor for orthodontic root resorption. *The European Journal of Orthodontics*, 35(6), 790–795. doi:10.1093/ejo/cjs100

Okano, T., y Sur, J. (2010). Radiation dose and protection in dentistry. *Japanese Dental Science Review*, 46(2), 112–121. doi:10.1016/j.jdsr.2009.11.004

Pereira, S., Lavado, N., Nogueira, L., Lopez, M., Abreu, J., y Silva, H. (2013). Polymorphisms of genes encoding P2X7R, IL-1B, OPG and RANK in orthodontic-induced apical root resorption. *Oral diseases*, 20(7), 659–667. <https://doi.org/10.1111/odi.12185>

Picanço, G. V., Freitas, K. M. S. de, Cançado, R. H., Valarelli, F. P., Picanço, P. R. B., y Feijão, C. P. (2013). Predisposing factors to severe external root resorption associated to orthodontic treatment. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 18(1), 110–120. doi:10.1590/s2176-94512013000100022

Pereira, S. A., Lopez, M., Lavado, N., Abreu, J. M., y Silva, H. (2014). A clinical risk prediction model of orthodontic-induced external apical root resorption. *Revista Portuguesa de Estomatologia Medicina Dentária e Cirurgia Maxilofacial*, 55(2), 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.rpemd.2014.03.001>

Rekhawat, A., Durgekar, S. G., y Reddy, S. (2020). Evaluation of Root Resorption, Tooth Inclination and Changes in Supporting Bone in Class II Malocclusion Patients Treated with Forsus Appliance. *Turkish journal of orthodontics*, 33(1), 21–30. <https://doi.org/10.5152/TurkJOrthod.2020.19037>

Rizell, S., Svensson, B., Tengström, C., y Kjellberg, H. (2006). Functional appliance treatment outcome and need for additional orthodontic treatment with fixed appliance. *Swedish Dental Journal*, 30(2), 61–68. <http://europepmc.org/abstract/MED/16878681>

Rodrigo, J. A. (2016, septiembre). Análisis discriminante lineal (LDA) y análisis discriminante cuadrático (QDA). *Ciencia de Datos*. Recuperado 21 de junio de 2022, de https://www.cienciadedatos.net/documentos/28_linear_discriminant_analysis_lda_y_quadratic_discriminant_analysis_qda

Sameshima, G. T., y Sinclair, P. M. (2001). Predicting and preventing root resorption: Part I. Diagnostic factors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 119(5), 505–510. doi:10.1067/mod.2001.113409

Sameshima, G. T., y Sinclair, P. M. (2001). Predicting and preventing root resorption: Part II. Treatment factors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 119(5), 511–515. doi:10.1067/mod.2001.113410

Segal, G., Schiffman, P., y Tuncay, O. (2004). Meta analysis of the treatment-related factors of external apical root resorption. *Orthodontics and Craniofacial Research*, 7(2), 71–78. doi:10.1111/j.1601-6343.2004.00286.x

Sharab, L. Y., Morford, L. A., Dempsey, J., Falcão-Alencar, G., Mason, A., Jacobson, E., ... Hartsfield, J. K. (2015). Genetic and treatment-related risk factors associated with external apical root resorption (EARR) concurrent with orthodontia. *Orthodontics y Craniofacial Research*, 18, 71–82. doi:10.1111/ocr.12078

Silva, Henriqueta Coimbra, Pereira, Sónia Alves, Canova, Filomena, Nogueira, Luís Mesquita, Lopez, Miguel Guevara y Lavado, Nuno. (2018). Orthodontically Induced External Apical Root Resorption with genetic and non-genetic factors [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1324556>

Topkara, A., Karaman, A. I., y Kau, C. H. (2012). Apical root resorption caused by orthodontic forces: A brief review and a long-term observation. *European journal of dentistry*, 6(4), 445–453.

Vasconcelos Picanço, G., Salvatore De Freitas, K. M., Cançado, R. H., Valarelli, F. P., Roberto, P., Picanço, B. y Feijão, C. P. (2013). Predisposing factors to severe external root resorption associated to orthodontic treatment. *Dental Press J Orthod*, 18(1), 110–130.

Vizcaíno-Salazar , G. J. (2017). Importancia del cálculo de la sensibilidad, la especificidad y otros parámetros estadísticos en el uso de las pruebas de diagnóstico clínico y de laboratorio. *Medicina Y Laboratorio*, 23(7-8), 365-386. <https://doi.org/10.36384/01232576.34>

World Nuclear Association. (2020). Pocket Guide: Radiation [Folleto]. <https://www.world-nuclear.org/getmedia/b8351b4a-82dc-4dee-a2a2-c42e295d0f61/Pocket-Guide-Booklet.pdf.aspx>

Yashin, D., Dalci, O., Almuzian, M. et al. Markers in blood and saliva for prediction of orthodontically induced inflammatory root resorption: a retrospective case controlled-study. *Prog Orthod*. 18, 27 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40510-017-0176-y>