

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA UNIÓN ESMALTE- DENTINA EN DIENTES HUMANOS: UN MODELO MECANICO-FUNCIONAL.

Gil-Chavarría, I^{1*}, García-García, R.², Reyes-Gasga, J.²

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Odontología UNAM.

²Lab. Nuevos Materiales. Depto. Materia Condensada. Instituto de Física UNAM

*Autor de correspondencia: ivetgil@gmail.com

RESUMEN

Los órganos dentarios son sistemas constituidos principalmente por dentina y esmalte. La dentina es el tejido que conforma la mayor parte del diente el cual está cubierto en la porción de la corona por el esmalte, lo que les permite llevar a cabo el trabajo mecánico-fisiológico tal como la masticación. A pesar que ambos tejidos tienen la misma matriz inorgánica (Hidroxiapatita, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), éstos presentan variaciones durante su mineralización las cuales se manifiestan en diferencias estructurales significativas, produciendo túbulos en el caso de la dentina y prismas en el esmalte. De aquí que es de gran interés conocer, identificar y entender el mecanismo que mantiene unidos a estos dos tejidos. En este trabajo la zona de unión, la cual se denomina como Unión Amelodentinaria o Unión Esmalte-Dentina (UED), fue analizada por Microscopía de Luz (ML), por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), por Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) y por Espectroscopía de Rayos-X (DRX) en dientes humanos. Esto nos permitió identificar el material que está presente en la UED, su composición química y su organización. Los resultados demuestran que la UED está constituida por material orgánico con una apariencia reticular la cual presenta proyecciones orgánicas y prolongaciones que emergen de la dentina hacia los espacios interprismáticos y abarcan a un grupo de prismas del esmalte. Se propone un modelo que esquematiza el diseño biológico de la UED.

Palabras Clave: Unión Esmalte-Dentina, Estructura, Microscopía Electrónica, Modelo Mecánico-Funcional.

STRUCTURAL BEHAVIOR OF THE JOINT ENAMEL-DENTIN IN HUMAN TEETH: A MECHANOFUNCTIONAL MODEL

ABSTRACT

Dental organs are systems composed by dentin and enamel mainly. Dentin is the mayor tissue component of tooth and enamel and covers the portion of the dental crown. This arrangement allows the teeth to carry out mechanical- physiological work such as chew. Although both tissues have the same organic matrix (Hydroxyapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), they exhibit variations during their mineralization processes which causes significant structural differences, producing a tubular zone in dentin and prismatic in enamel. Therefore, it is very interested to know, identify and understand the mechanism by which these two important tissues keep together. In this work the union zone, which is called amelodentinal junction or dentin-enamel junction (UED), was analyzed by light microscopy (ML), Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM) and X-Ray Spectroscopy in human tooth. The results gave us the composition and organization of material in the UED. A structure of organic material with reticular semblance with projections and prolongations coming from the dentin toward to inter prismatic enamel space surrounding a set of enamel prisms. It is suggested a model to schematize the biological design of UED.

INTRODUCCIÓN

La Unión Amelodentinaria o Unión Esmalte-Dentina (UED) cuenta con una organización estructural propia para el trabajo que realiza el diente. Para entender su conformación hay que tomar en cuenta los procesos biológicos que se llevan a cabo para su formación, así como responder a preguntas tales como: ¿qué es el

esmalte?, ¿qué es la dentina?, ¿con qué y cómo permanecen unidos en la pieza dental?.

A la fecha, la UED sigue siendo un tema de discusión, incluyendo la forma de definirla. Ten Cate (1) describe a la UED como una zona festoneada, al igual que Doukoudakis (2). Sin embargo, en publicaciones recientes, Marshall (3), reporta que “la UED es una estructura pobremente definida” y Gallagher (4)

menciona que “La UED es una interfase crítica de dos tejidos duros”.

Las características más evidentes de los dos tejidos que conforman la UED son los siguientes. El esmalte, es el tejido externo que cubre la corona del diente, se forma por acción de la mineralización de la matriz orgánica producida por los ameloblastos. Los ameloblastos son células de origen epitelial que pierden su actividad después de finalizar la mineralización del esmalte, quedando constituido por el 96% de material inorgánico y solo 4% de material orgánico y agua. Su unidad estructural son los prismas, los cuales miden en promedio de 4 a 8 micrómetros. El esmalte presenta un grosor mayor en oclusal, principalmente en las cúspides, y se adelgaza hacia cervical. Sus características físicas son de translucidez y de impermeabilidad, además de que se le reconoce como el tejido con mayor dureza del cuerpo humano. La dentina es el tejido que constituye casi en su totalidad la estructura dental. Es un tejido mineralizado; sin embargo, la matriz proteica que induce este proceso es secretada por células mesenquimatosas llamadas odontoblastos. A diferencia de las células del esmalte, la actividad celular de los odontoblastos continúa mientras el órgano dentario tenga vitalidad pulpar. Cuenta con un 70% de material inorgánico y un 30% de sustancia orgánica y agua. Su unidad estructural son los túbulos dentinarios, los cuales contienen procesos odontoblásticos o remanentes de fluidos orgánicos. Se han descrito diferentes tipos de dentina dependiendo de su ubicación: la dentina coronaria, que está cercana a la UED y la radicular. Por su actividad fisiológica se clasifica en intertubular, peritubular y de reparación.

La UED surge durante la formación de la dentina y el esmalte; aunque se considera que desde antes de la formación de los dos tejidos involucrados “existe interacción celular entre las células de origen epitelial (ameloblastos) y las de origen mesenquimatoso (odontoblastos) mediante las fibras de Von Korff”, como lo describe Jones (5). Para la formación de los cristales se

requiere del proceso denominado Biogénesis Mineral. Sin embargo Veis (6) describe dos variantes de dicho proceso: La “Mineralización biológicamente inducida”, en el cual el cristal puede asumir orientaciones al azar así como una variedad de tamaños y la “Mineralización mediada por matriz (o matriz controlada)”, donde se genera un cristal único bien definido y orientado”. Por las características de los cristales presentes en los tejidos ya maduros, estos dos procesos de mineralización, corresponden el primero a la dentina y el segundo al esmalte. Así que ambos tejidos requieren una base orgánica para la formación de la hidroxiapatita. La matriz orgánica del esmalte está constituida según Veerappan (7) por “60% de proteínas y 40% de lípidos, donde los lípidos se identificaron en los espacios interprismáticos”. Respecto a las proteínas, la más abundante en el esmalte es la amelogenina, aunque también está la enamulina y tuftelina; pero “no hay colágena” según Ragazzoni (8). En la dentina predomina la colágena tipo I, la cual provee el soporte físico y el medio favorable para el depósito mineral (9), y otras proteínas no colágenas como la sialoproteína dentina y fosfoproteína dentina (10), además de glicoproteínas y proteoglicanos (11).

Bordier (12) describe la mineralización de la matriz orgánica para el esmalte como para la dentina en la siguiente forma. “Los primeros dos pasos incluyen los procesos iniciales de nucleación y la formación de partículas de tamaño nanométrico, los cuales darán lugar a la formación del cristal. Estos procesos comprenden la nucleación heterogénea de fosfato de calcio inorgánico y de una matriz orgánica extracelular, regulados en ambos tejidos por esa matriz y expresiones celulares”. Todos estos procesos biológicos se centran en la relación entre los cristales de esmalte y dentina y en la función de las matrices orgánicas para la formación de la UED, debido a que desde la amelogénesis y dentinogénesis hay una interacción en la interfase dada por las fibras de Von Korff (13). Por lo tanto, la composición y la organización estructural que presenta la

UED es el resultado de los procesos biológicos que se llevan a cabo durante la formación del diente; su composición estructural debe corresponder a restos de la matriz orgánica necesaria para mineralizar los tejidos inorgánicos.

En este trabajo analizamos estructural y químicamente la zona de la UED por Microscopia de Luz (ML), por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y por Microscopia Electrónica de Transmisión (MET) en dientes humanos. También se realizó el análisis por Difracción de Rayos X (DRX). Los resultados demuestran que la UED está constituido por material orgánico el cual forma un arreglo complejo con una apariencia reticular y presenta prolongaciones que emergen de la dentina hacia el esmalte y “abrazan” a un grupo de prismas del esmalte. Se propone un modelo que esquematiza la estructura de la UED.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en dientes humanos sin caries y sin fracturas coronarias, en su mayoría terceros molares retenidos y premolares, con extracción indicada para tratamiento de ortodoncia, tanto superiores como inferiores, los dientes eran de sujetos con edades comprendidas entre 18 y 35 años. Las intervenciones se realizaron en la clínica de Cirugía Maxilofacial de la División de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Odontología UNAM.

La preparación de la muestra se realizó de acuerdo a los protocolos del laboratorio de Nuevos Materiales. Para las muestras de ML se realizaron cortes de dientes en las regiones oclusal, medio o cervical, tanto en sentido longitudinal como en sentido transversal, y se seleccionaron únicamente donde estuviera presente la UED. Las muestras fueron pulidas a espejo y grabadas con ácido fosfórico al 37%, y se lavaron con agua destilada. El equipo usado fue un microscopio de luz de la marca Zeiss, modelo Axiotech, y un microscopio invertido Zeiss, modelo Axiovert 25. Para las muestras

de MEB y MET, los dientes se incluyeron en resina-acrítica, se hicieron los cortes antes mencionados y fueron pulidos a espejo.

Los siguientes pasos variaban dependiendo si eran muestras para microscopia de barrido o de transmisión. En el caso de MEB, las muestras se montaron en el portamuestras con cinta de carbón, se grabaron con ácido fosfórico y se recubrieron con una película de oro. Se usó el microscopio Jeol 5200 para su observación el cual cuenta con EDS de la marca Noran. Las muestras de MET fueron adelgazadas hasta 100 micras, después se formó una concavidad hasta adelgazar la zona más profunda en 20 micras aproximadamente y finalmente se erosionaron mediante iones de argón para perforar la zona más delgada. Se montaron en una rejilla de cobre y se recubrieron con una película delgada de carbón. Se usó el Microscopio Jeol 100CX (IFUNAM). Debido a que por el procesamiento de la muestra se eliminaba el material de la unión, éste se modificó empleando el proceso de fijación por glutaraldehído al 2.5%, con un pH entre 7.3 y 7.4, inmediatamente después de la extracción. Ya con la conservación de la estructura, se emplearon métodos físicos (separación mecánica) y químicos (ácido nítrico 5%) para la eliminación del esmalte y exponer la UED sobre la superficie de la dentina. Para el análisis por DRX, las muestras se trituraron hasta formar polvo, para obtener todas las orientaciones de los cristales de esmalte y dentina. El polvo obtenido fue tamizado con un tamiz de 325 mesh y analizados. Para este análisis se usó el difractor de rayos X Bruker, modelo D8-Advanced.

RESULTADOS

La figura 1 muestra la imagen de ML de la UED, en la cual se observa la zona festoneada y los penachos del esmalte.



Fig. 1. Imagen de la zona de la UED. Note la forma festonada que presenta, se observan los penachos del esmalte y las líneas que corresponden a los túbulos de la dentina.

Las características estructurales del esmalte (fig. 2) y la dentina (fig. 3) fueron observadas con mayor detalle por MEB en donde se identifican los prismas del esmalte y los túbulos dentinarios. En el espacio interprismático se encuentra distribuido el material orgánico. Los túbulos dentinarios alojan en su interior a las prolongaciones de los odontoblastos (células formadoras de la dentina). Estos se presentan como orificios en las imágenes en sentido transversal y como prolongaciones en sentido longitudinal.

Una vez identificadas las diferencias entre el esmalte y la dentina, es más fácil describir la zona de unión entre estos tejidos, es decir la UED. Las imágenes de MEB siempre mostraron un espacio de separación entre esmalte y dentina (fig. 4). Al recorrer toda la interfase entre los dos tejidos, se observaron en algunas secciones de las muestras la presencia de un material que unen al esmalte con la dentina y viceversa.

La figura 5 presenta la imagen de MET de la UED donde se observan las zonas correspondientes del esmalte y de la dentina y sus correspondientes patrones de difracción de electrones de área selecta.

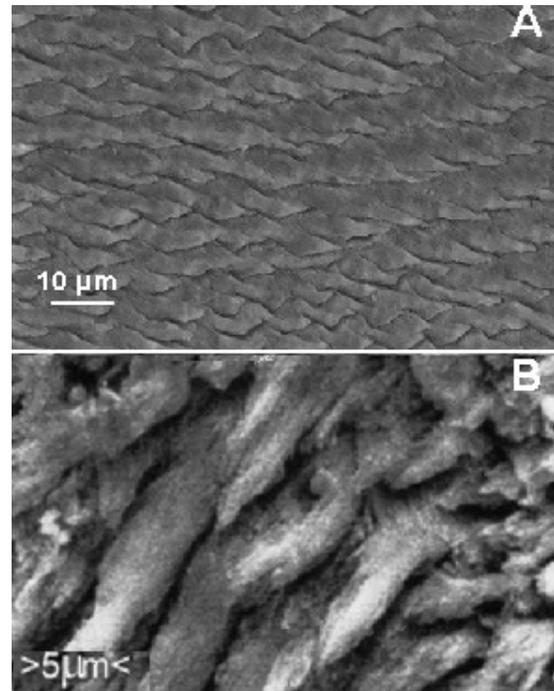


Fig. 2. Imágenes de MEB del esmalte dental humano donde se observan los prismas, la unidad estructural del esmalte, tanto en dirección transversal (A) como en longitudinal (B).

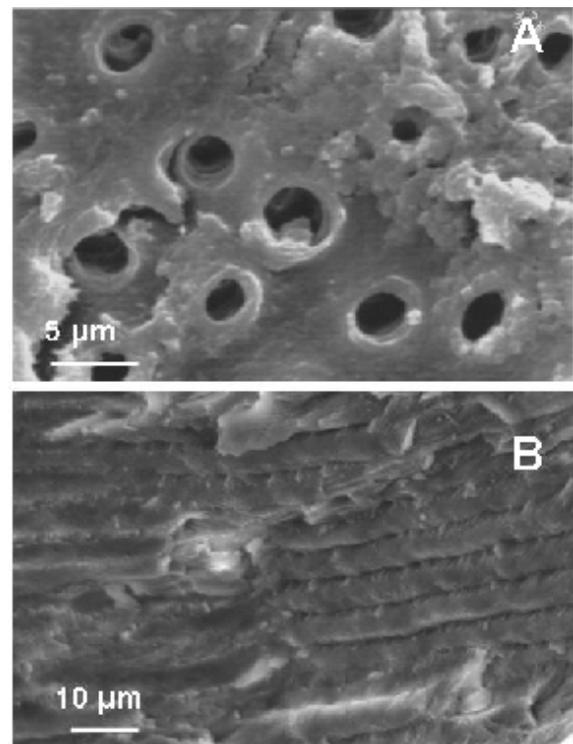


Fig. 3. Imágenes de MEB de la dentina humana donde se observan los túbulos dentinarios tanto en dirección transversal (A) como en longitudinal (B).

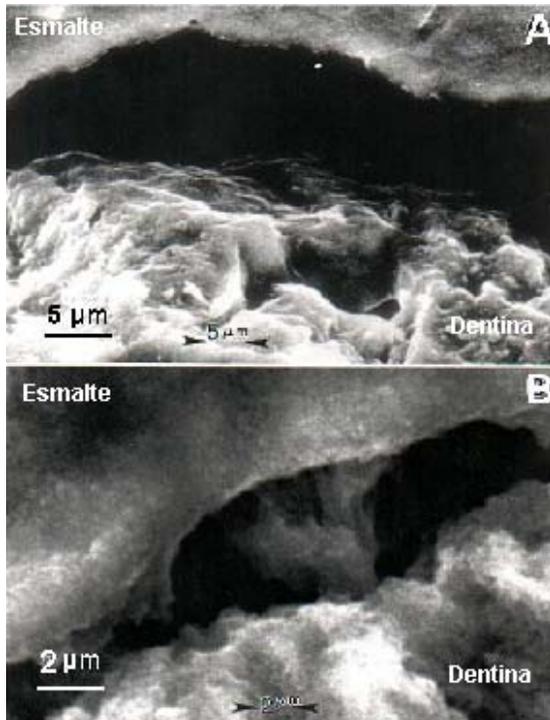


Fig. 4. Imágenes de MEB de la zona de la UED. La dentina y el esmalte se encuentran separados (A) y en ciertos casos se observaron las prolongaciones odontoblásticas entre el esmalte y la dentina (B).

La indexación de estos patrones indica que ambos corresponden a la celda hexagonal de la hidroxiapatita y la diferencia que se observa entre ellos se debe al tamaño y distribución que presentan los cristales de hidroxiapatita en el esmalte y la dentina. En el caso del esmalte, los cristales de hidroxiapatita son del orden de micras y presentan texturización. En el caso de la dentina, los cristales de hidroxiapatita son de orden nanométrico y se encuentran distribuidos al azar, dando lugar al patrón de difracción de anillos concéntricos. Estos resultados son consecuencias de los diferentes procesos de mineralización determinado por las matrices proteicas, y que, además, se manifiestan al exhibir las características tan específicas ya observadas y descritas anteriormente de cada tejido.

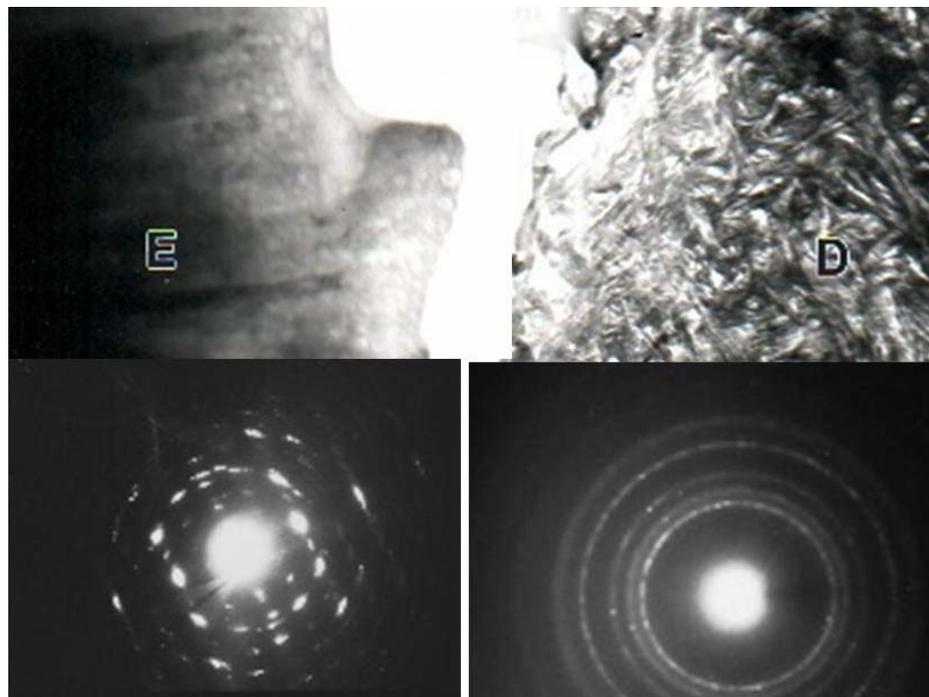


Fig. 5. Imagen de MET en campo claro de la UED donde se observan el esmalte (E) y la dentina (D), y sus correspondientes patrones de difracción. La indexación de ambos patrones de difracción indican que corresponden a la celda hexagonal de la hidroxiapatita.

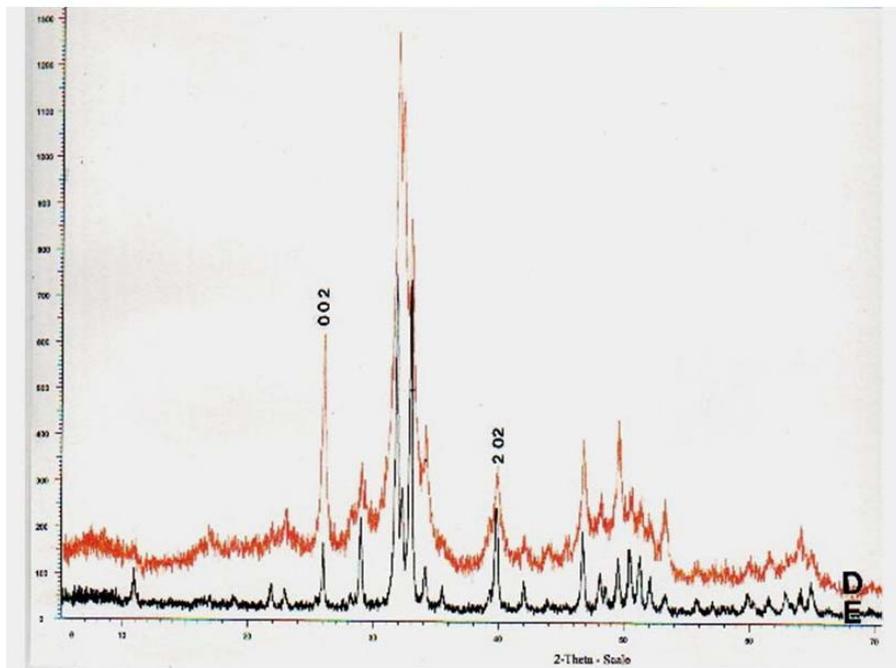


Fig. 6. Difractograma de rayos x de la dentina (D) y del esmalte (E). La indexación de estos difractogramas indica que los cristales corresponden a la celda hexagonal de la hidroxiapatita, pero con distinto tamaño de cristal y distinto arreglo.

El análisis de difracción de rayos-X corrobora ampliamente estos resultados. La figura 6 muestra los difractogramas obtenidos para las muestras de esmalte y la dentina. La indexación de estos espectros concuerda con los obtenidos por MET ya que indica que los cristales corresponden a la celda hexagonal de la hidroxiapatita, pero con distinto tamaño de cristal y distinto arreglo. En el caso de la dentina, el espectro es menos cristalino que el del esmalte.

El análisis por MET, desafortunadamente, no da mayor información puesto que, entre otras cosas, al preparar la muestra, la metodología empleada eliminaba el material orgánico presente en la UED, por lo cual se tuvieron que retomar las técnicas de MEB anteriores con las que ya se habían obtenido los resultados más favorables, pero ahora incluyendo los métodos de fijación.

Las imágenes obtenidas en MEB de la UED de muestras preparadas que incluyen el proceso de fijación, confirman

que existe un material entre esmalte y dentina que presenta cierto arreglo (fig. 7).

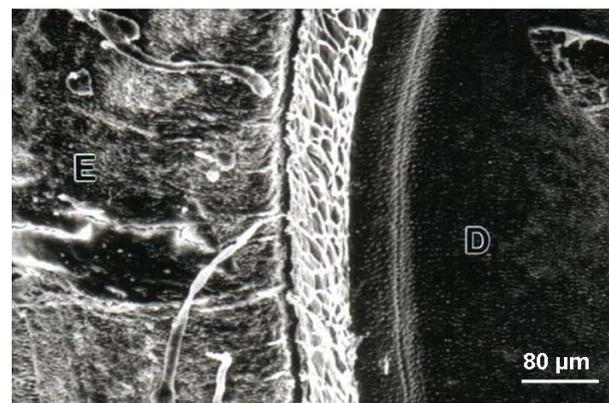


Fig. 7. Imagen de MEB de la UED de una muestra previamente fijada. Esta imagen muestra la presencia de un material de unión en la interfase entre el esmalte (E) y la dentina (D).

A partir de este resultado, por medios mecánicos se eliminó de la muestra, al esmalte de la zona de la UED

dejando completamente al descubierto la superficie dentinaria.

Esto permitió observar el arreglo que presenta este material, tal y como se observa en la figura 8. Las prolongaciones del material presentes en la superficie de la dentina en la zona de la UED tienen dimensiones de 10-17 μm (fig. 8b) las cuales se extienden hasta la

estructura prismática del esmalte. Sin embargo, la altura de estas prolongaciones o extensiones del material varían sus dimensiones de un sitio a otro en la zona de la UED, como se observa en las zonas cervicales donde presentan una altura menor y la red que muestra la figura 8 es un poco más abierta, mientras que en las zonas oclusales e incisales, son extensiones de mayor altura (fig. 9).

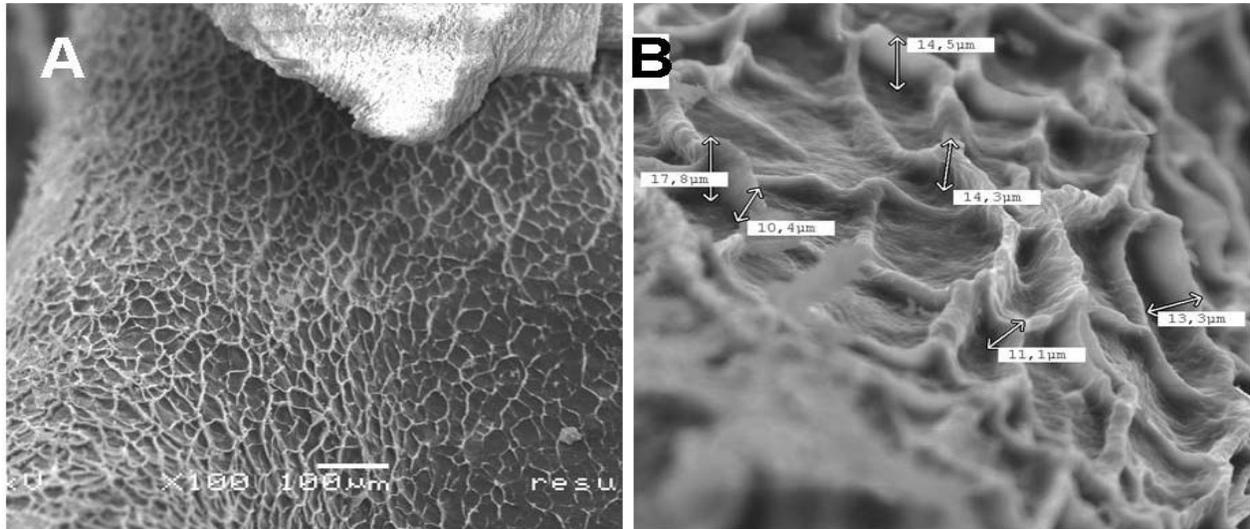


Fig. 8. Imágenes de MEB de la superficie dentinaria después de haber eliminado el esmalte. A) Imagen de la estructura reticular que presenta el material de unión en la UED. B) Dimensiones de la altura que presenta esta red con un promedio de 14 μm .

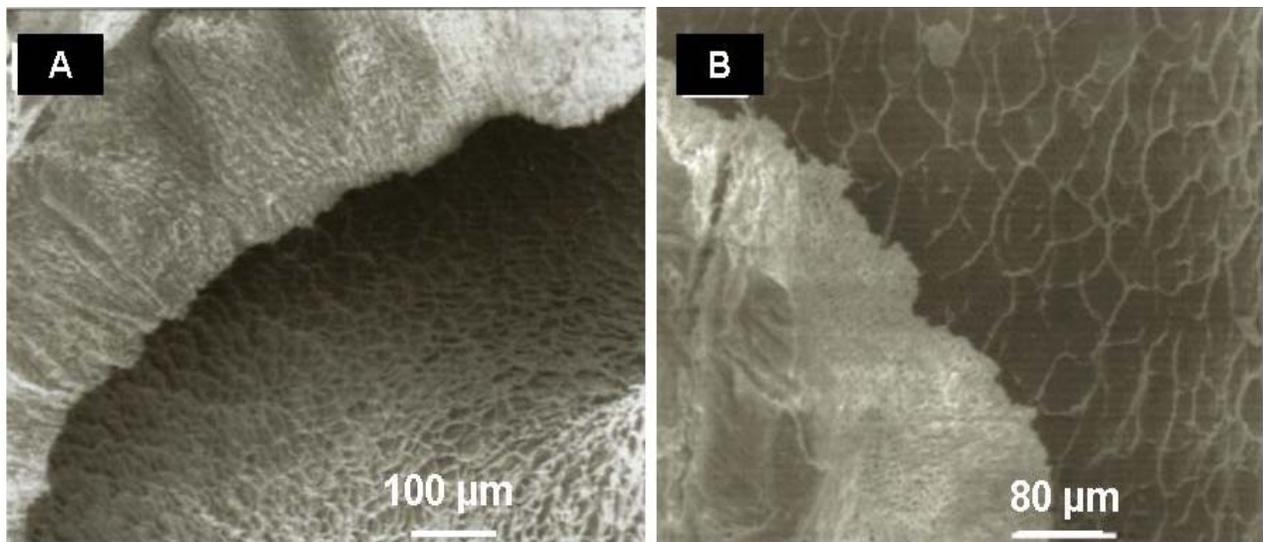


Fig. 9. Imágenes de MEB de la superficie de la dentina en la UED. A) Zona oclusal de una cúspide de un molar. B) Zona cervical del mismo molar. Nótese la diferencia en las dimensiones del arreglo que se presenta.

Este comportamiento morfológico tiene que ver con la funcionalidad, ya que en la zona oclusal, el esmalte tiene mayor grosor para la constitución de las cúspides y resistir las fuerzas masticatorias o de incisión en el caso de los dientes anteriores.

La figura 10 muestra el arreglo “reticular” observado en la zona de la UED. Debido a que esta red que se localiza entre los dos tejidos mineralizados, es de esperarse que su función mecánica está fuertemente relacionada con la de amortiguación, además de mantener unidos al esmalte con la dentina, conservando la estructura aún para la situación extrema de los trabajos mecánicos-fisiológicos como la masticación.

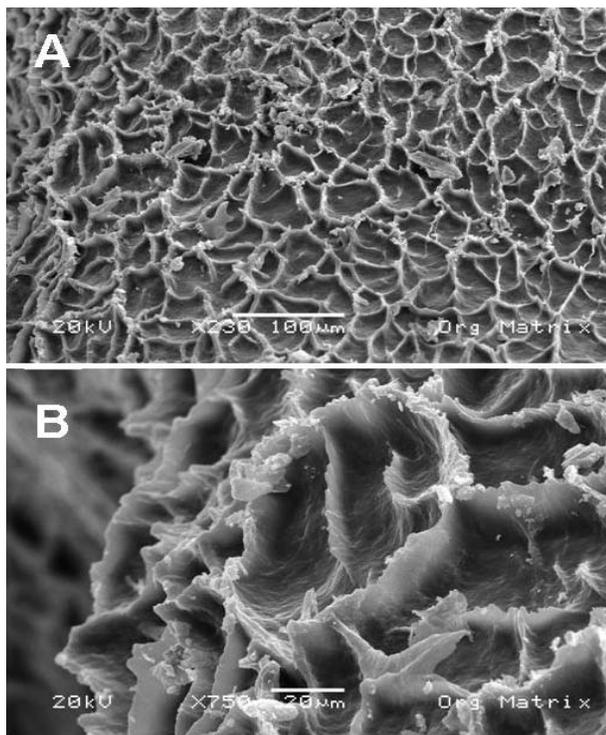


Fig. 10. Imágenes de MEB de la superficie de la dentina donde se observa la red que conforma la UED. La imagen en (B) es una ampliación de la imagen en (A).

Por lo tanto, es de crucial importancia conocer su composición química. Los espectros de EDS indican que el material de esta red lo conforma principalmente el carbón en 47.61% at., el nitrógeno en 9.67% at., y el oxígeno en 40.21% at. (fig. 11), demostrando que se trata de un material orgánico, seguramente proveniente de

restos proteicos necesarios para la mineralización del esmalte y la dentina (14-17). Este material orgánico se distribuye entre los tejidos inorgánicos de tal forma que su base es sobre la dentina, emergiendo probablemente de los túbulos dentinarios y llegando hasta los espacios inter-prismáticos del esmalte formando así un sistema biológico funcional.

Se realizaron mapeos químicos del material reticular para determinar la distribución de los elementos que lo conforman (fig. 12). De esta manera se identificó que este material sí está formado por elementos orgánicos y que la presencia de Ca y P se debe a la superficie de la dentina en la que se encuentra la UED.

DISCUSIÓN

En la UED ocurren procesos biológicos con el funcionamiento coordinado de una serie de eventos que permiten el desarrollo del esmalte y la dentina. Desde el inicio de la odontogénesis, los ameloblastos y los odontoblastos presentan interacciones celulares epitelio-mesenquimatosas, estableciendo una relación estrecha mediante las fibras de Von Korff. En esta etapa dicha unión es amelodentinaria porque une a los ameloblastos con los odontoblastos. Las células secretan una matriz orgánica extracelular con la cual se llevará a cabo el depósito mineral para la formación de los tejidos, antecediendo la dentinogénesis a la amelogénesis y al finalizar la mineralización, generan y dan lugar a la unión entre esmalte y dentina.

Aunque el depósito mineral para la formación de la dentina es previo al del esmalte y sean procesos independientes, parecen llevar un orden secuencial y ambos son fosfatos de calcio, los cuales se ha reportado sintetizar mediante diferentes métodos (18).

A pesar de que no hay relaciones entre los cristales de un tejido y otro, el esmalte necesita una plataforma dentinaria debido a que la organización de la matriz del esmalte se ve influenciada por la estructura de superficie de la dentina.

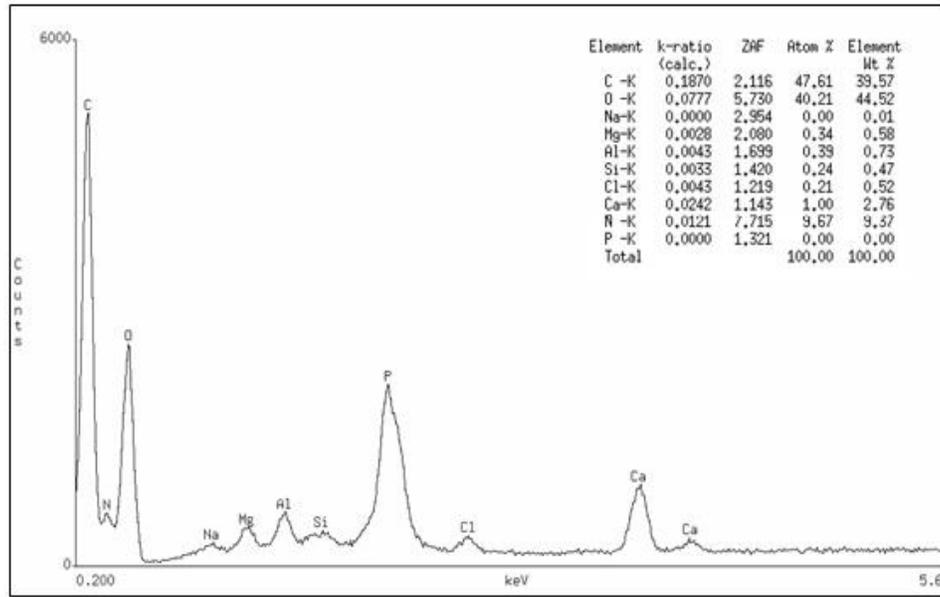


Fig. 11. Espectro de EDS con sus respectivos porcentajes tanto atómicos como de peso del material reticular observado en la superficie de la dentina y mostrado en la figura 10.

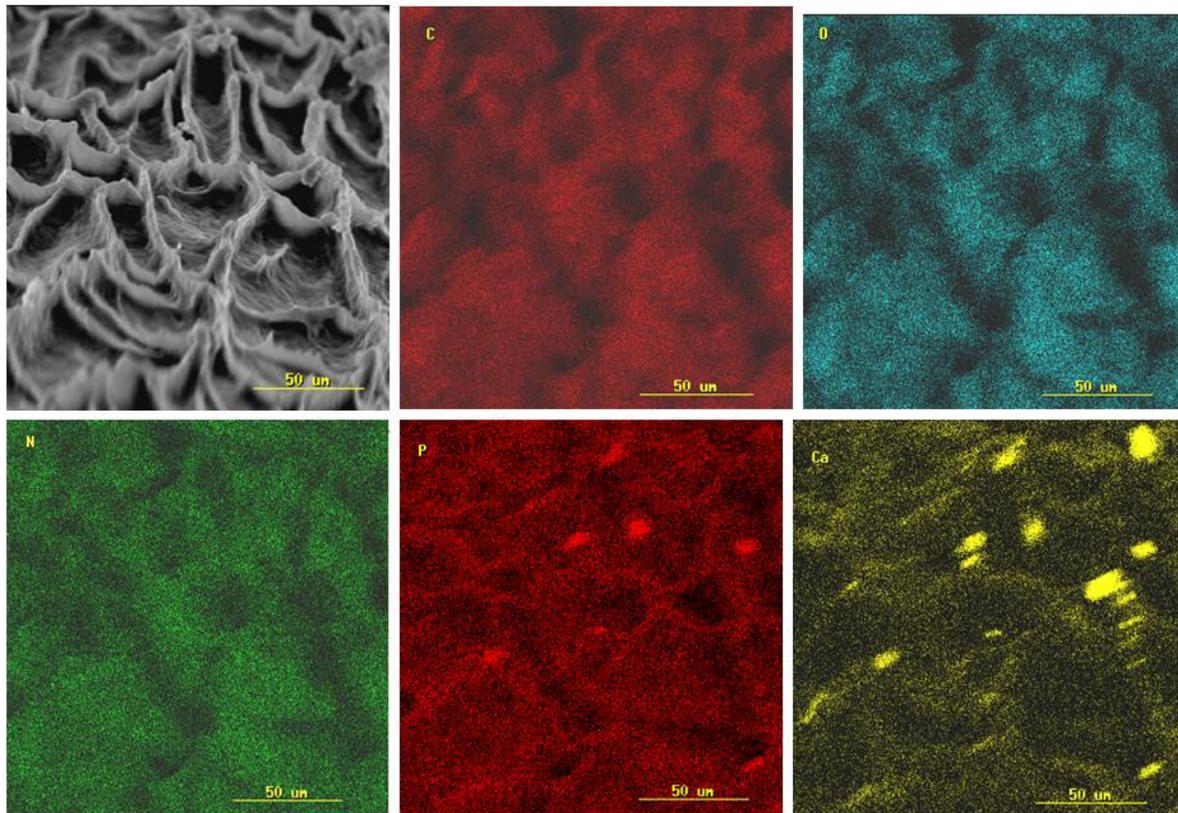


Fig. 12. Mapeo químico del material reticular observado en la superficie de la dentina mostrando la distribución de C, O, N, Ca, y P. Nótese que la señal del Ca y el P provienen de las partículas sobrepuestas a este material.

El desarrollo de los cristales se caracteriza por las diferencias en la distribución de Ca y P, reflejando un patrón de mineralización distinto uno del otro, es decir, en tamaño, el arreglo; todo esto determina la organización del material orgánico (19), conservando cada tejido su estructura sin tener alguna relación cristalina (15). Sin embargo, Yoshihiko (16) reportó que existe en algunas zonas de la UED una conexión directa de los cristales, revelado mediante una franja enrejada de los cristales de dentina penetrando y contactando directamente con los cristales del esmalte.

Los dos tejidos presentan, por lo tanto, estructuras diferentes que se conservan aún en zonas cercanas a la UED, a pesar de que la base inorgánica es la misma (hidroxiapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$).

Se ha observado que la organización cristalina del esmalte es de forma organizada, es decir, el tamaño de los cristales está bien definido y orientado y la organización de la dentina esta dada por cristales con orientaciones al azar y con una variedad de tamaños. Esos tejidos mineralizados interactúan con el material orgánico, resultado de las matrices extracelulares producidas por ameloblastos y odontoblastos; por lo tanto, la UED debe tener residuos proteicos (20, 21,22), como colágena (23). Se ha reportado que las proyecciones que emergen de la dentina no llegan hasta el esmalte (8, 24); sin embargo, hay discrepancias respecto a esto porque otras evidencias, además de nuestras observaciones, muestran que llegan hasta el esmalte y se insertan en los espacios interprismáticos (25, 26, 27). Estas prolongaciones no están presentes en todos los espacios. Por la morfología que presenta la UED de red, cada concavidad abarca un conjunto de prismas; para tener esta organización, los cristales adoptan ciertas posiciones para permitir alojar al material orgánico en los espacios interprismáticos. A esto es a lo que se conoce como Estrías de Retzius que están dadas por las parazonas y diazonas (28).

Las prolongaciones de la red difieren en altura dependiendo de la zona en que se observe: siendo más estrecha y más alta en regiones oclusales o incisales y más abierta y de menor altura en las regiones cervicales. Esto se da en relación directa a las funciones del diente y la interacción entre los tejidos y las fuerzas dentales (29); la estructura está conformada de acuerdo a la función del tejido. La UED, constituida de elementos orgánicos y proteicos, mantiene la interfase entre dos tejidos estructuralmente distintos, sin establecer relación cristalina, la cual se ha referido como zona de separación, es en realidad una zona de unión gracias a la organización estructural de sus componentes que le confiere propiedades mecánicas, a las coronas de los dientes para llevar a cabo sus funciones (30).

MODELO MECÁNICO-FUNCIONAL DE LA UED

Con los resultados presentados en este trabajo se propone un MODELO MECANICO-FUNCIONAL (Diseño Biológico) para la UED (fig. 13). La UED, es el resultado de la mineralización del esmalte y la dentina; siendo un material orgánico que podría contener algunos residuos proteicos (tales como colágena) debido a su funcionalidad y estructura observada. Los residuos proteicos se distribuyen de tal manera que forman una estructura reticular sobre la superficie de la dentina. Las prolongaciones de este material orgánico llegan hasta los espacios interprismáticos abarcando un conjunto de prismas (fig. 14). La longitud de estas prolongaciones varía, siendo menores en cervical y más altas en superficies oclusales e incisales, lo cual se asocia con la anatomía y a la función que tiene cada zona del diente.

Es necesario comentar que las proyecciones que emergen de la dentina llegan hasta el esmalte pero no a todos los espacios interprismáticos ya que cada concavidad de la red orgánica abarca un conjunto de prismas.

Los prismas adoptan ciertas posiciones para alojar al material orgánico en los espacios interprismáticos.

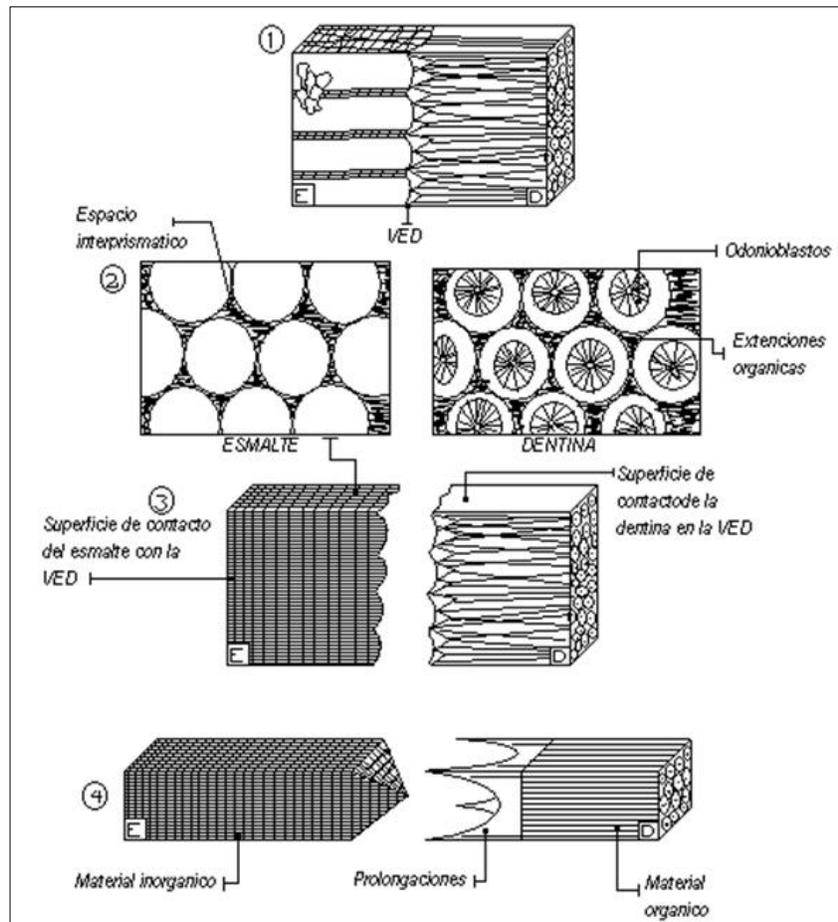


Fig. 13. Esquemática de la estructura de la UED. 1) La UED es caracterizada con una línea festoneada entre esmalte y dentina. 2) Cortes transversales del esmalte, con prismas y los espacios interprismáticos, y de la dentina, con túbulos dentinarios y prolongaciones odontoblásticas. 3) Superficies de contacto de los dos tejidos. 4) Arreglo de las prolongaciones que forman la retícula y que se insertan en espacios interprismáticos del esmalte.

Las protuberancias de la red formada difieren en altura, es más estrecha y alta en regiones oclusales o incisales en el caso de los dientes anteriores y en cambio, la red parece ser más abierta y de menor altura en las regiones cervicales, demostrando que esta arquitectura está dada

en base a las funciones de desempeño del diente, proporcionando soporte mecánico y amortiguación, para evitar la fractura del esmalte, y por ende la separación de los tejidos y la exposición de la dentina.

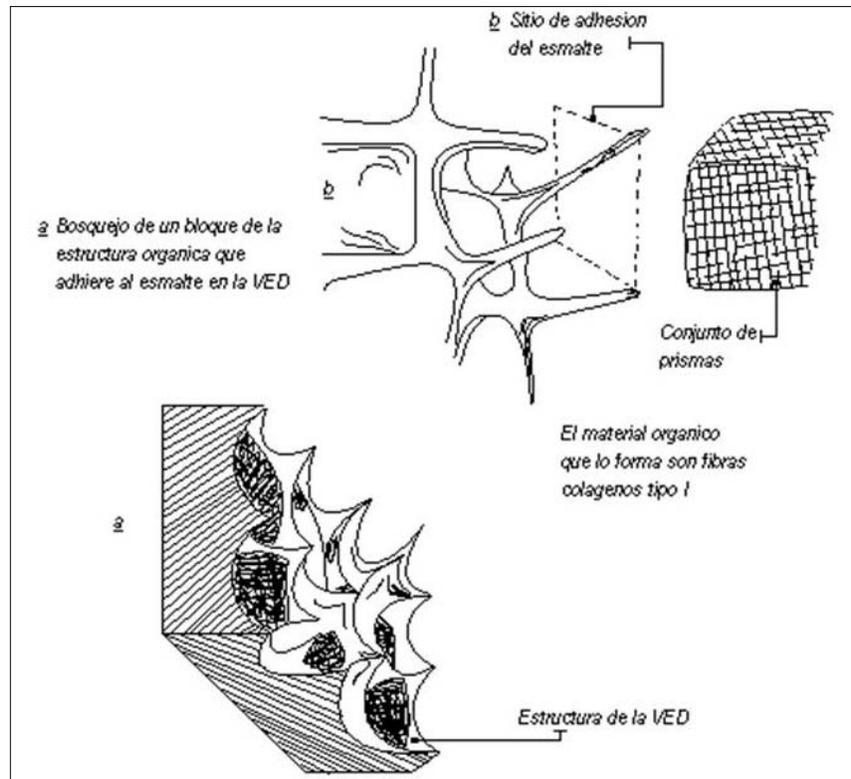


Fig. 14. Esquematación de la estructura y organización del material orgánico reticular observado en la UED dando lugar a un Diseño Biológico funcional.

CONCLUSIÓN

En base a los estudios realizados de MEB, DRX y EDS, se concluye que la estructura de la UED está conformada por un arreglo reticular de material orgánico que mantiene unidos a los tejidos del esmalte y la dentina. Esta red se distribuye sobre la superficie de la dentina y coincide unívocamente con los prismas, ya que a cada prolongación no corresponde un espacio interprismático, sino que ancla a un conjunto de prismas. Esta estructura de origen proteico presenta concavidades entre cada retícula y es la responsable del festoneado que ha caracterizado la UED. A partir de estos resultados se estableció el modelo propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a R. Hernández, J. Cañetas, C. Magaña, M. Aguilar, A. Gómez Cortés, P. Mexía y S. Tehuacanero por el apoyo técnico que nos brindaron durante la elaboración del presente trabajo. También

agradecemos a la DGAPA-UNAM (Proyecto IN-117906) el apoyo económico para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Ten Cate, Arnold R. (1993) "Histología Oral", Buenos Aires. Pág. 536.
- [2] Spyros Doukoudakis, Nikos Kranias, Margarita Spanou, Minos Stavridakis. (1997) "Morphologic characteristics of dentin at the dentin-enamel junction as viewed by scanning electron microscopy". Journal of Esthetic Dentistry Vol.9 No.2 Págs. 94-99.
- [3] Marshall GW Jr, Balooch M., Gansky S. (2001) "Mechanical properties of the dentinoenamel junction: afm studies of nanohardness, elastic modulus, and fracture". Journal Biomed. Material Research Jan. 54 (1) Págs. 87-95.

- [4] R.R. Gallagher, S.G. Demos, M. Balooch, G.W. Marshall, Jr., S.J. Marshall. (2003) “Optical spectroscopy and imaging of the dentin-enamel junction in human third molars”. *J. Biomed. Mater. Res.* Vol. 1;64(2) Págs. 372-377.
- [5] Sheila J. Jones, Alan Boyde. (1998) “Dentin and Dentinogenesis”, Volumen I, Chapter 4: Ultrastructure of dentin and dentinogenesis. Pag.81
- [6] Arthur Veis, Joseph Barss, Thomas Dahl, Mohammed Rahima and Stuart Stock. (2002). “Mineral-related proteins of sea urchin teeth: *Lytechinus variegatus*”. *Microscopy Research and Technique* No. 59 Págs. 342-351.
- [7] Veerappan Girija, Hsu Chin-Ying Stephen. (2003) “Characterization of lipid in mature enamel using confocal laser scanning microscopy” *Journal of Dentistry* No. 31 Págs. 303-311.
- [8] Ragazzoni E, Martignoni M, Cocchia D. (1995) “The morphological and histochemical characteristics of the interprismatic structures and the human enamel. a light microscopy study”. *Minerva Stomatologica* July-August Volumen44 No.(7-8) Págs 376.
- [9] William T. Butler. (1998) “Dentin and Dentinogenesis” Volumen II, Chapter 8: Dentin collagen, chemical structure and role in mineralization. Pag:37
- [10] Jian Q. Feng, Xianghong Luan, John Wallace, Dai Jing, Tosió Ohshima, Ashock and B. Kulkarni. (1998) “Genomic organization, chromosomal mapping, and promoter analysis of the mouse (*Dspp*) dentin sialophosphoprotein gene, which codes for both dentin sialoprotein and dentin phosphoprotein”. *The Journal of Biological Chemistry* Vol. 273 No. 16 April 17 Págs. 9457-9464.
- [11] Anders Linde. (1998) “Dentin and Dentinogenesis” Volumen II, Chapter 9, Noncollagenous proteins and proteoglycans in dentinogenesis. Pág.55
- [12] P. Bordier-Houllé, P. Steuer, J.M. Meyer, L. Bigeard. (2000) “High-resolution electron-microscopic study of the relationship between human enamel and dentin crystals at the dentinoenamel junction”. *Cell Tissue Res.* 301 Págs. 389 - 395.
- [13] Shroff B, Thomas HF. (1992) “Investigation of the role of Von Korff fibers during murine dentinogenesis”. *Journal of Biology Buccale* September Volumen 20 Number 3 Págs. 139-144.
- [14] Thomas G.H. Diekwish, Brett J. Berman, Steven Gentner, Harold C. Slavkin. (1995). “Initial enamel crystals are not spatially associated with mineralized dentine”. *Cell and Tissue Research* No. 279 Págs: 149-167.
- [15] P. Anderson, J. C. Elliott, U. Bose and S. J. Jones. (1990) “A comparison of the mineral content of enamel and dentine in human premolars and enamel pearls measured by x-ray microtomography”. *Archs. Oral Biology* Vol.41 No.3 Págs. 281-290.
- [16] Yoshihiko Hayashi. (1992) “High resolution electron microscopy in the dentino-enamel junction”. *Journal Electron Microscopy* 41 Págs. 387-391.
- [17] Toshihiko Inage, Takahisa Kasamo, Takahiro Yoshida, Toshikazu Suzuki, Tetsuo Sekiguchi and Takashi Takezawa. (1984) “Ultrastructural localization of alkaline phosphatase in fish enamel organ”. *J Nihon Univ Sch Dent.* 26(3) Págs. 187-201
- [18] Chen Lai, ShaoQiu Tang, YingJun Wang, Kun Wei (2005) “Formation of calcium phosphate nanoparticles in reverse microemulsions” *Materials Letters* 59 Págs. 210-214.
- [19] Arnold WH, Gaengler P. (2007) “Quantitative analysis of the calcium and phosphorus content of developing and permanent human teeth” *Ann Anat* 189 (2). Págs. 183-190.

- [20] Meyer JM, Bodier-Houlle P, Cuisinier FJ, Lesot H, Ruch JV. (1999). "Initial aspects of mineralization at the dentino-enamel junction in embryonic mouse incisor in vivo and in vitro: A TEM comparative study". *In vitro Cell Dev. Biol. Anim. Mar* 35(3) Págs. 159-68.
- [21] J.P. Simmer and A.G. Finchman. (1995) "Molecular mechanisms of dental enamel formation". *Crit. Rev. Oral Biol. Med.* Vol. 6 No. 2 Págs 84-108
- [22] Mary MacDougall, Darrin Simmons, Xianghong Luan, Jasón Nydegger, Jian Feng and Ting Ting Gu. (1997) "Dentin phosphoprotein and dentin sialoprotein are cleavage products expressed from a single transcript coded by a gene on human chromosome 4. (Dentin phosphoprotein DNA sequense determination)". *The Journal of Biological Chemistry* Vol. 272 No. 2 Págs. 835-842 .
- [23] Chun P. Lin, William H. Douglas and Stanley L. Erlandsen. (1993). "Scanning electron microscopy of type I collagen at the dentin-enamel junction of human teeth". *Journal of Histochemistry and Citochemistry* Vol. 41 No. 3 Págs: 381-388.
- [24] Margaret R. Byers and Akira Sugaya. (1995). "Odontoblast proceses in dentin revealed by fluorescent Di-I". *The Journal of Histochemistry and Citochemistry* Vol.43 No.2 Págs. 159-168
- [25] M.J. Sigal, J.E. Aubin, A.R. Ten Cate and S. Pitaru. (1984) "The odontoblast process extends to the dentinoenamel junction: an immunocytochemical study of rat dentin". *The Journal of Histochemistry and Citochemistry.* Vol. 32 No.8 Pags.872-877.
- [26] Sigal MJ, Aubin JE, Ten Cate AR. (1985) "An immunocytochemical study of the human odontoblast process using antibodies against tubulin, actin, and vimentin". *J. Dental R. Dec.* 64(12) Págs. 1348-55
- [27] Sigal MJ, Aubin JE, Ten Cate AR. (1984). "A combined scanning electron microscopy and immunofluorescence study demonstrating that the odontoblast process extends to the dentinoenamel junction in human teeth". *Anat. R. Nov* 210(3) Págs. 453-62
- [28] Hanaizumi Y, Kawano Y, Ohshima H, Hoshino M, Takeuchi K, Maeda T. (1998) "Three-dimensional direction and interrelationship of prisms in cuspal and cervical enamel of dog tooth". *Anat. Rec. Nov* 252(3) Págs. 355-368.
- [29] Xu HH, Smith DT, Jahanmir S, Romberg E, Kelly JR, Thompson VP, Rekow ED. (1998). "Indentation damage and mechanical properties of human enamel and dentin". *J. Dental Research* Mar 77(3) Págs. 472-480.
- [30] Paul Zaslansky, Asher A. Friesem, Steve Weiner. (2006) "Structure and mechanical properties of the soft zone separating bulk dentin and enamel in crowns of human teeth: Insight into tooth function" *Journal of Structural Biology* 153 . Págs. 188-199.