



ציקסים: צמחים עתיקים עם חיידקים שחיים בשורשים שלהם

Fernando López Restrepo*, Diego Garfias Gallegos, Pablo de Jesús Suarez Moo

המעבדה הלאומית לגנומיקה ולמגוון ביולוגי, מרכז למחקר ולימודים מתקדמים של המכון הפוליטכני הלאומי, אירפואטו, מקסיקו

סוקרות צעירות

AURA

גיל: 14



MANU

גיל: 14



ציקס

(Cycad)

צמחי זרעים עתיקים מאוד ששרדו עד ימינו. הם יכולים ליצור סימביוזה מיוחדת דרך השורשים הקורלואידים שלהם.

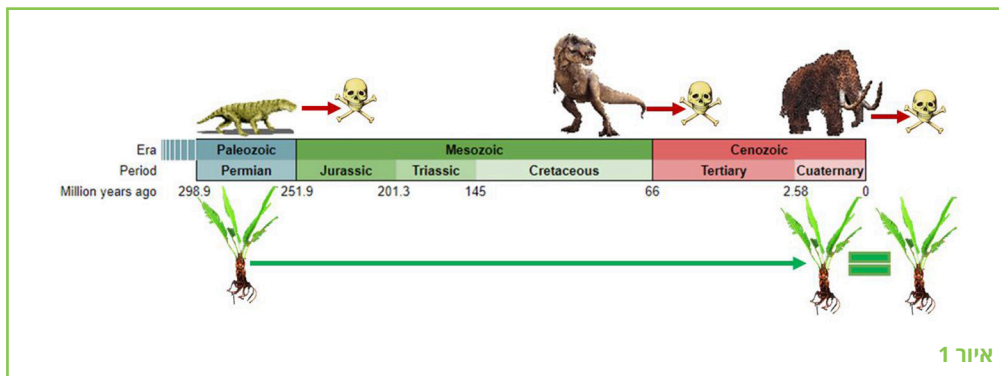
האם אי פעם ראיתם תמונה של דינוזאור והבנתם שישנו צמח דמוי דקל לידו? אולי הלכתם בשכונה שלכם וראיתם שם את אותו סוג צמח? באופן מדהים, הצמחים העתיקים האלה, שנקראים ציקסים, נמצאים בסביבה במשך מיליוני שנים. צמח ציקס יחיד יכול לחיות עד 2,000 שנים! אנו חושבים שהסוד להישרדותם של ציקסים וחיהם הארוכים קשור במבנה מיוחד מאוד שנקרא שורש קורלואידי, שבתוכו חיים מיקרובים. אנו חקרנו את השורשים הקורלואידים האלה ומצאנו מגוון גדול של מיני חיידקים שחיים בתוכם, יותר ממה שיכולנו לדמיין. כשהסתכלנו מקרוב על החיידקים האלה, מצאנו שהם יכולים לייצר הרבה תרכובות שיכולות לסייע להם לתקשר עם עצמם ועם הצמח, להעביר חומרי מזון ולבצע פעולות אחרות שהן עדיין בגדר תעלומה.

ציקסים: צמחים עתיקים יותר מדינוזאורים

ציקסים הם צמחי זרעים עתיקים שהופיעו לפני עידן הדינוזאורים, במהלך תקופת הפרם לפני כמעט 280 מיליוני שנים. כמה שדינוזאורים היו מצוינים, מרביתם נכחדו בעוד שאחרים בסופו של דבר התפתחו לציפורים. אולם ציקסים היו מסוגלים לשרוד עד היום, ועדיין נראים כמעט בדיוק כמו האבות הקדמונים שלהם שחיו לצד דינוזאורים (איור 1)! אם זה לא מספיק מגניב,

איור 1

הרבה יצורים חיים הופיעו ונעלמו מכדור הארץ, בעוד שציקסים המשיכו לחיות. ההופעה החיצונית שלהם לא השתנתה, אולם אנו חושבים שהשורשים שלהם השתנו ושהם הסוד להישרדות שלהם.



איור 1

ציקסים יכולים לחיות בתנאי סביבה קיצוניים עם מעט מאוד חומרי מזון, היכן שצמחים אחרים לא יכולים לשרוד, כולל דיונות חול, צוקים ואפילו סלעים [1].

כיצד ציקסים הצליחו להפגין מעשה גבורה מרשים כל כך של הישרדות? לציקסים, כמו לגיבורי-על, יש יכולות שונות שמאפשרות להם להתנגד לסביבות קשות, אולם ייתכן שכוח-העל המרכזי שלהם נמצא בתוך השורשים. ציקסים יכולים ליצור מבני שורש ייחודיים שנקראים **שורשים קורלואידים**, שנראים כמו אלמוגים ימיים זעירים שמסתעפים משורש ראשי. שורשים קורלואידים משיגים חומרי מזון עבור הצמח, בעיקר חנקן. חנקן (N_2) הוא גז שכיח באטמוספירה. N_2 יכול להילקח על-ידי אורגניזמים מסוימים, ולהיות מומר לאמוניה (NH_3), שהיא חומר מזון שציקסים יכולים להשתמש בו כדי לחיות ולגדול. התהליך הזה נקרא קיבוע חנקן. קיבוע חנקן הוא אחת הפונקציות שמבוצעות על-ידי אורגניזמים שנקראים **אנדופיטים**, שהם מיקרובים (כמו חיידקים למשל), שחיים בתוך השורשים הקורלואידים. האנדופיטים נמצאים באינטראקציה אינטימית עם הצמח, שנקראת **סימביוזה** [2].

כדי להבין סימביוזת ציקס-אנדופיט, אנו צריכים לחשוב על הגוף שלנו. כולנו שמענו את האמרה "אתם מה שאתם אוכלים", וייתכן שגם שמעתם שאנו צריכים לכלול חיידקים מסוימים, שנקראים פרוביוטיקה, בתזונה שלנו. זה נכון שהתזונה היא מקור חשוב להשיג חיידקים שיחיו בחלק מהרקמות והאיברים שלנו, כמו למשל במעי (איור 2). החיידקים המועילים שחיים בתוכנו מסייעים לנו לעכל את המזון שלנו, ליצור כימיקלים בריאים ואפילו להגן עלינו מפני מיקרובים שנקראים פתוגנים [3]. אולם, מה לגבי ציקסים? האם ישנם חיידקים שחיים בתוכם? אם כן, מה החיידקים האלה עושים, וכיצד הם עושים זאת? מדענים שמנסים לענות על שאלות כאלה הסתכלו בתוך השורשים הקורלואידים כבר יותר מ-100 שנים. אולם, רק לאחרונה גילינו את המגוון הגדול של חיידקים והפונקציות המעניינות שלהם בתוך השורש הקורלואידי, כולל חיידקים שמבצעים קיבוע חנקן.

ראשית, מאיפה החיידקים האלה מגיעים? טוב, אנו חושבים שחלק מהמיקרובים האלה יכולים לעבור בתורשה מאימו של הצמח דרך הזרע, באופן דומה לכך שתינוקות אנושיים מקבלים חלק מהחיידקים מאימם דרך הנקה. אולם, נראה שמרבית החיידקים בתוך השורש הקורלואידי מגיעים מהאדמה שהכי קרובה לשורשים, שנקראת **ריזוספירה**. ציקסים מייצרים חומרים שמושכים חיידקים לריזוספירה. החיידקים האלה נצמדים לפני השטח של הציקסים, ונכנסים לרקמות הפנימיות של השורש הקורלואידי, דרך כמה חורים זעירים בדפנות של תאי הצמח.

שורש קורלואידי (Coralloid Root)

שורשי ציקס מיוחדים שבהם חיים חיידקים מועילים.

אנדופיט (Endophyte)

כל אורגניזם שחי בתוך צמח.

סימביוזה (Symbiosis)

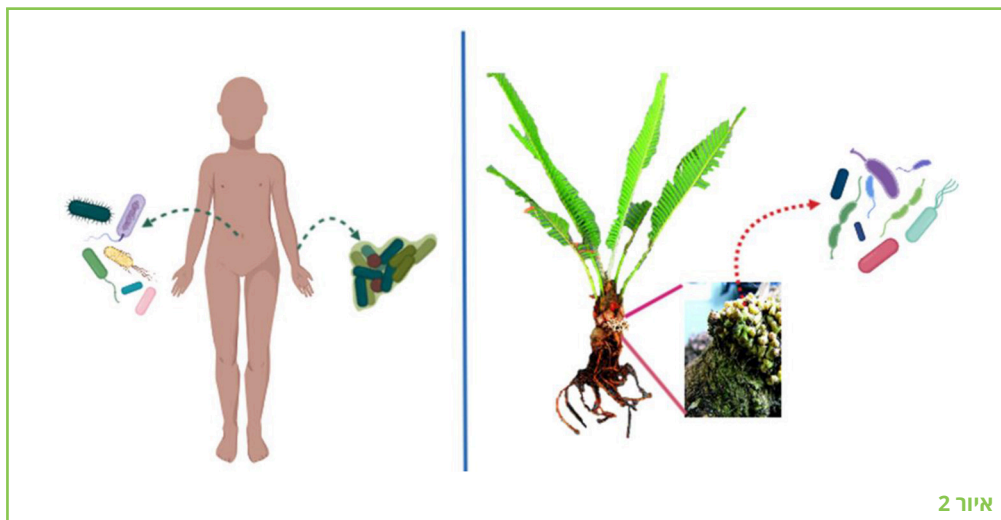
כל קשר קרוב וארוך טווח בין שני מיני אורגניזמים, או יותר.

ריזוספירה (Rhizosphere)

האדמה שנמצאת במגע ישיר עם שורשי הצמח.

איור 2

לציקדות, ממש כמו לגוף שלנו, יש חיידקים מסייעים זעירים משלהם.



אנו יודעים מעט על אלה חיידקים שחיים באדמה יכולים להיכנס לשורשי הציקס, או אפילו כמה מהם למעשה יכולים להישאר שם. כמה סוגי חיידקים נמצאים בתוך השורשים? האם כל סוגי החיידקים נכנסים, או האם זהו "מועדון VIP" מיוחד? מה ההשפעה שיש לחיידקים האלה על ציקסים? שאלות המפתח האלו לא נענו עדיין, מאחר שמרבית המחקרים המוקדמים שבוצעו על שורשים קורלואידים התמקדו בסוג מסוים מאוד של חיידקים שנקראים **ציאנובקטריה**. ציאנובקטריה הם מומחים בקיבוע חנקן, מה שהופך אותם לחשובים מאוד. אולם, חשבנו שאולי, כמו במעיים האנושיים, ישנם כמה סוגי חיידקים, ולא רק ציאנובקטריה. כשבחנו את הרעיון הזה, מצאנו שישנם הרבה מיקרובים אחרים בשורש הקורלואידי, ושהשורש עשוי להיות סוג של "מועדון VIP", שבו רק אנדופיטים מסוימים נכללים.

מבט קרוב יותר אל שורשיה של הציקס

ההשערה שלנו הייתה שלשורש הקורלואידי, ולכל המיקרובים השונים שחיים בתוכו, יש תפקיד חשוב ביכולתו של הציקס לשגשג בסביבות שונות. כדי לבחון את הרעיון הזה אספנו שורשים קורלואידים ודגימות אדמה מסוג הצמח של ציקסים שנקרא *Dioon*, גם מגנים בוטניים וגם מאזורים טבעיים. סוג (*genus*) הוא קבוצה שמורכבת מהרבה מינים קשורים. ה-*Dioon cycads* נמצאים בעיקר במקסיקו, והם בסכנת הכחדה, מה שגורם לכך שקשה למצוא אותם, ולכן היינו צריכים להיזהר מאוד שלא לפגוע בהם. מרבית הציקסים גדלו במקומות שקשה לגשת אליהם, ולכן היינו צריכים להשתמש במכשור הנכון, בהרבה נחישות, ובמעט מזל.

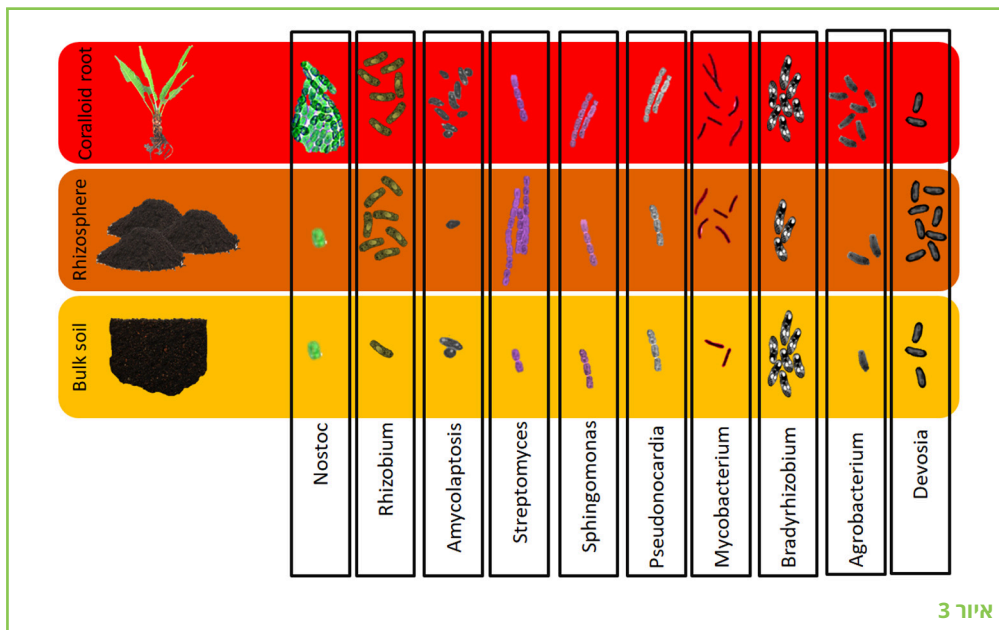
אספנו דגימות של שורשים קורלואידים, ואחסנו אותם בחנקן נוזלי (חומר קר ביותר עם טמפרטורה של כ-200 מעלות צלזיוס), כדי לשמר את הדנ"א. אספנו גם את הריזוספירה ואדמה נוספת מהאזורים שסביב לציקסים. הפרדנו את דגימות השורשים הקורלואידים על בסיס המקור שלהם (מיקום טבעי או גן בוטני), והסתכלנו על מספר המינים השונים של חיידקים בכל דגימת אדמה ושורש.

ציאנובקטריה (Cyanobacteria)

מיקרואורגניזמים עם יכולת לבצע פוטוסינתזה (ממש כמו צמחים!) ולקבע חנקן לתרכובות מועילות.

איור 3

כמויות וסוגים שונים של חיידקים נמצאו בכל שלוש המחלקות: שורשים קורולואידים, ריזוספירה וגושי אדמה מכל הצמחים שנחקרו. סוגי החיידקים מצוינים בתחתית האיור, והמספר שמוצג ליד כל סוג דגימה מראה אם נמצאה כמות קטנה או גדולה שלהם באותה דגימה. האיור הזה משלב את התוצאות לצמחים גם מסביבות טבעיות וגם מגנים בוטניים. אתם יכולים לראות שרק חלק מהחיידקים משגשגים בשורשים, בעוד שאחרים בקושי מצליחים לגדול.



איור 3

החברים הרבים מאוד של הציקסים

מצאנו שישנם 246 סוגים של חיידקים בדגימות השורש והאדמה, אולם מרבית החיידקים בדגימות השתייכו ל-10 סוגים (איור 3). זה אמר לנו שרק לכמה קבוצות חיידקים יש תפקידים חשובים מאוד. באופן מעניין, מצאנו כמות גדולה יותר של מיני ציאנובקטריה בדגימות הטבעיות מאשר בדגימות מגנים בוטניים. מדוע מצאנו את ההבדלים האלה? אולי מאחר שאדמה ממקומות טבעיים מכילה פחות חומרי מזון מאדמה בעצמים בגנים בוטניים. משמעות הדבר יכולה להיות שציאנובקטריה מסייעים לציקסים להשיג חומרי מזון מהאדמה, והם פחות נדרשים בגנים בוטניים מאשר בטבע. "מועדון ה-VIP" של השורשים הקורולואידים כולל חיידקים מקבועי חנקן אחרים, נוסף על ציאנובקטריה, כמו למשל ריזוביום, בצילוס וסטרפטומיציין, שגם ידוע שהם חיים בשורשים הקורולואידים של ציקסים אחרים מלבד Dioon.

מדוע אנו קוראים לשורש הקורולואידי "מועדון VIP"? מאחר שרק חלק קטן מהמיקרואורגניזמים שחיים מחוץ לציקס יכולים להיכנס לשורש הקורולואידי. כתוצאה מכך, המספרים והסוגים של חיידקים בתוך השורש הקורולואידי שונים מאלה בגושי האדמה ובריזוספירה, כפי שאפשר לראות באיור 3. האם הצמח בוחר אלה סוגי חיידקים חברים ב"מועדון ה-VIP", או האם רק חלק מסוגי החיידקים יכולים לשרוד בתוך השורשים? האם לחיידקי ה-"VIP" האלה יש יכולות מיוחדות שמאפשרות להם להיות חברים במועדון? מדענים עדיין מנסים לענות על השאלות האלה. מה אתם חושבים?

מאחר שהציקסים מסוג Dioon שחקרנו קשורים באופן הדוק זה לזה, חשבנו שכולם עשויים לאפשר לאותם סוגי חיידקים להיכנס לתוך השורשים הקורולואידים שלהם. אולם מצאנו הבדלים בסוגי החיידקים בשורשי הצמחים שגדלים בסביבה טבעית לעומת בגן בוטני. אנו חושבים שזה נובע מהאדמה שהציקסים האלה גדלים בתוכה, כמו גם בהבדלים קטנים בין צמחים קשורים. חשבו שוב על בני אדם: ידוע שגננים ותזונה של בני אדם מעצבים את סוגי החיידקים שנמצאים במעייהם שלנו. יכול להיות שזה אותו הדבר עם ציקסים מסוג Dioon -

ייתכן שהם שולחים אותות שונים שמושכים סוגי מיקרואורגניזמים שונים לשורשים שלהם. המנגנון המסוים של בחירת האנדופיטים הקורלואידים עדיין לא ידוע, והגורמים שמעורבים בבחירת החברים בכל "מועדון VIP" עדיין לא התגלו.

כיצד ציאנובקטריה עשויים לסייע לציקסים לשרוד?

האם החיידקים שחיים בשורשים הקורלואידים הם המפתח להישרדות המדהימה של ציקסים? כדי לחקור זאת, מדענים בדקו אם ציאנובקטריה מסוגלים לייצר תרכובות מיוחדות שעשויות לסייע לציקסים לשרוד. המדענים הסתכלו על אזורים בדנ"א החיידקי שמקודדים חלבונים שנקראים **מטבוליטים**, שהם חומרים שיכולים לסייע לאורגניזמים לשרוד בתנאי סביבה קשים. אנו קוראים לחלקי הדנ"א האלה **biosynthetic gene clusters**, או BGCs בקיצור [4].

מדענים חיפשו 77 BGCs ידועים בדנ"א של מיני ציאנובקטריה קרובים. מתוך ה-BGCs האלה, ארבעה היו משותפים בין כל סוגי הציאנובקטריה שמצאנו בתוך השורשים הקורלואידים. ה-BGCs האלה ייצרו חלק מהרעלים שיכולים למנוע מחיידקים לגדול, וייתכן שהם מגינים על הצמח. ישנם גם מטבוליטים ומולקולות שחיידקים משתמשים בהם כדי לתקשר עם אנדוסימביונטים אחרים, ולספק חומרי מזון לצמח, כמו למשל מולקולות שנושאות יוני מתכת שנקראות סידרופורים. המולקולות האלה מסייעות בספיגה של יונים מסוימים, שאחרת לא היו נגישים לצמח. היונים האלה יכולים לתווך את התגובה המטבולית של כמה חיידקים שחברים בקהילה; ולכן לשנות את האותות שהמיקרואורגניזמים מקבלים מהסביבה שלהם.

אז, מה הלאה?

הנתונים שנאספו במחקר הזה מספקים לנו תמונה די טובה של קהילות החיידקים בתוך השורשים הקורלואידים של ציקסים. אנו חושבים שאולי הציקסים שרדו מאז עידן הדינוזאורים בלי שינוי חיצוני מאחר שהאנדופיטים של הציקסים הם אלה שמשתנים ומספקים מטבוליטים ויכולות חדשות להתמודדות עם תנאי סביבה קשים. אולם עדיין יש הרבה דברים שאיננו יודעים על הצמחים האלה והאנדוסימביונטים שלהם, ומדענים עדיין מנסים לחקור את האינטראקציות שלהם.

לפני שנסיים, נציין תצפית מעניינת נוספת שנערכה במחקר שלנו. כשהסתכלנו בתוך שורשים קורלואידים, ראינו סוג אורגניזם אחר שכמעט ולא נחקר בכלל: פטריות! עד כה, כל מה שאנו יודעים על פטריות בשורשים קורלואידים הוא שסוגי פטריות שונים חיים במין ציקס בודד. נכון להיום איננו יודעים כמה הפטריות משפיעות על אורגניזמים אחרים, וכיצד הן מתקשרות עם הציקסים והחיידקים הסימביונטים. אנו חושבים שפטריות עשויות לשמש כרשת שמביאה מטבוליטים לצמח, או אולי כהגנה של הצמח או החיידקים. אולם הפטריות גם עשויות להתחרות על מקום בתוך השורשים, מה שמאלץ את החיידקים לעבוד יחד. כפי שאתם יכולים לראות, עדיין יש הרבה דברים לחקור על הצמחים העתיקים האלה ועל השורשים הקורלואידים שלהם. מה שאנו לומדים על הצמחים האלה עשוי לסייע לנו להבין כיצד קשרים סימביוטיים בין אורגניזמים נוצרו במקור בצמחים, וכיצד הקשרים האלה מוסתים. מאחר שכל האורגניזמים המוכרים תלויים בקשרים שלהם זה עם זה, המידע הזה יכול לומר לנו הרבה על האופן שבו

מטבוליט (Metabolite)

חומר שנוצר במהלך חילוף חומרים (מטבוליזם) של אורגניזם.

Biosynthetic Gene Cluster (BGC)

חלקים בדנ"א שמייצרים חומרים מסוימים.

חיות וצמחים שרדו והתפתחו במהלך היסטוריית האבולוציה, לא כישויות נפרדות אלא כחלק מקהילות. רק הזמן יגיד לנו מה תגליות העתיד יראו לנו על היצורים שאנו חולקים איתם את העולם!

מאמר המקור

Suarez-Moo, P. J., Vovides, A., Griffith, M. P., Barona-Gómez, F., and Cibrian-Jaramillo, A. 2019. Unlocking a high bacterial diversity in the coralloid root microbiome from the cycad genus *Dioon*. *PLoS ONE*. 14:e0211271. doi: 10.1371/journal.pone.0211271

מקורות

1. Norstog, K. J., and Nicholls, T. J. 1997. *The Biology of the Cycads*. New York, NY: Cornell University Press.
2. Kneip, C., Lockhart, P., Voß, C., and Maier, U. G. 2007. Nitrogen fixation in eukaryotes—new models for symbiosis. *BMC Evol. Biol.* 7:55. doi: 10.1186/1471-2148-7-55
3. Christian, N., Whitaker, B. K., and Clay, K. 2015. Microbiomes: unifying animal and plant systems through the lens of community ecology theory. *Front. Microbiol.* 6:869. doi: 10.3389/fmicb.2015.00869
4. Gutierrez-García, K., Bustos-Díaz, E. D., Corona-Gomez, J. A., Ramos-Aboites, H. E., Selem-Mojica, N., Cruz-Morales, P., et al. 2019. Cycad coralloid roots contain bacterial communities including Cyanobacteria and *Caulobacter* spp. that encode niche-specific biosynthetic gene clusters. *Genome Biol. Evol.* 11:319–34. doi: 10.1093/gbe/evy266

פורסם אונליין: 28 בינואר 2022

נערך על ידי: Francisco Barona-Gomez

מנחה מדעי: Michelle Munguía Figueroa

ציטוט: López Restrepo F, Garfias Gallegos D and Suarez Moo PdJ (2022) ציקסים: צמחים עתיקים עם חיידקים שחיים בשורשים שלהם. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2019.00156-he

תורגם והותאם: López Restrepo F, Garfias Gallegos D and Suarez Moo PdJ (2020) Cycads: Ancient Plants With Bacteria Living in Their Roots. *Front. Young Minds* 7:156. doi: 10.3389/frym.2019.00156

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זהו .López Restrepo, Garfias Gallegos and Suarez Moo 2022 © 2020 © **COPYRIGHT**. מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרות צעירות

AURA, גיל: 14

קוראים לי Aura. אני בת 14. אני גרה בגואנחואטו, מקסיקו, ואני אוהבת לרקוד. אני חושבת שכל המדעים מעניינים מאוד.



MANU, גיל: 14

קוראים לי Manuela, אבל כולם קוראים לי Manu. אני בת 14 ואני בשנה שנייה של חטיבת הביניים. אני אוהבת רכיבה על סוסים ואומנויות. כשאגדל אני רוצה להיות ביולוגית ימית, או ללמוד גסטרונומיה.



הכותבים

FERNANDO LÓPEZ RESTREPO

אני סטודנט לתארים מתקדמים עם תשוקה לעולם שסביבנו, ולכל המאכלסים שלו. יש לי רקע בחקר מקצבים צירקדים, סטרט סביבתי ואינטראקציות בין אורגניזמים. התחלתי להתעניין במדע ובביולוגיה על-ידי קריאה על החיות שאנו חולקים איתן את העולם, והצמא שלי לידע מעולם לא פסק מאז. יש לי גם תשוקה להיסטוריה, למוזיקה ולעיצוב יצורים. *fernando.lopez.r@cinvestav.mx



DIEGO GARFIAS GALLEGOS

אני אוהב אומנות מאז שהמלודיות של באך ושופן דחפו אותי לראות שישנן שאלות ששווה לשאול, ותשובות שכדאי לגשת אליהן באמצעות פרספקטיבות שונות. אני אובססיבי לגבי פנטזיה ועולמות שלא התגלו, כמו אלה שטולקין ובראדבורי תיארו, ומה שבסופו של דבר דחף אותי לחפש תשובות במדע היה שישנם עולמות שלמים שמחכים להתגלות.



PABLO DE JESÚS SUAREZ MOO

כיום אני פרופסור במכון לאקולוגיה (INECOL), מקסיקו, שם אני חוקר את תפקידם של מיקרואורגניזמים (מיקרובים) ברווחה (כשר) של צמחים וחיות. כשהתחלתי לחקור ביולוגיה, תחום המחקר שלי היה ביולוגיה של כרישים (כרישים הם כל כך מגניבים), אולם כיום אני מתעניין בעולם המיקרוסקופי (בעיקר פטריות וחיידיקים), והקשר (סימביוזה) בין צמחים לבין חיות. באמצעות טכנולוגיות חדשות, אנו מגלים את התכונות המועילות של מיקרואורגניזמים למארחים שלהם (זה כל כך מגניב!).



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK